

# Caracterización de dispositivos fotovoltaicos espaciales



**Alberto Martínez Álvarez**  
**Damián Javier Lombardi Gómez**

**Proyecto Final de Carrera**  
**de**  
**Enginyeria Tècnica de Telecomunicació**  
**Especialitat Sistemes Electrònics**

**EPSEVG**  
**UPC**

*Director:* **Pablo R. Ortega Villasclaras**  
*Ponente:* **Pere Gayà Suñer**  
**Departament de Enginyeria Electrónica**

**Julio 2009**



Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



# Proyecto Final de Carrera

*Título:*

**Caracterización de dispositivos fotovoltaicos para aplicaciones espaciales**

*Proyectistas:*

**Martínez Álvarez, Alberto** *floyd.sorrow@gmail.com*

**Lombardi Gómez, Damián Javier** *damianlombardi@yahoo.com*

*Titulación:*

**Enginyeria Tècnica de Telecomunicació**

*Especialidad:*

**Especialitat Sistemes Electrònics**

*Plan:*

**1995**

*Director:*

**Pablo R. Ortega Villasclaras**

*Ponente:*

**Pere Gayà Suñer**

**Departament de Enginyeria Electrònica**

**Calificación del PFC:**

**Presidente**

**Secretario**

**Vocal**

Fecha de lectura: 10/07/2009

Hora: 11:15

Lugar: AULA A-28

Este proyecto tiene en cuenta aspectos medioambientales:  Sí  No



## Resumen

Este trabajo surge de la mejora del diseño de VectorSol, sensor solar utilizado en el sistema de control de actitud del satélite Nanosat-1B puesto en órbita en 2008. De la investigación y desarrollo se realizan cambios en el principio de funcionamiento y se crea el VectorSolFino de mayor precisión. Se realiza la fabricación de 32 sensores en una oblea de silicio en sala blanca y posteriormente hay que clasificarlos según su calidad y caracterizarlos para comprobar el rango de funcionamiento.

La introducción es informativa de conceptos de dispositivos espaciales, se hace una reseña histórica desde el comienzo de la idea de VectorSol y se justifican el proyecto final de carrera.

En el capítulo uno se explica el principio de funcionamiento del sensor, desde el origen del primer VectorSol hasta la sectorización del campo de visión en el nuevo sensor solar. Se hace un resumen del funcionamiento de la célula solar y sus parámetros característicos. Y por último se expone el método de fabricación en sala blanca.

El capítulo dos describe el entorno de trabajo, el laboratorio de caracterización del campus Nord de la UPC, sus instrumentos, máquinas utilizadas y sistema de medición. Se exponen los conceptos de luz solar, su espectro, características y estándares utilizados.

En el capítulo tres se realizan las mediciones en oscuridad para la clasificación de los datos construidos. Se muestran características I-V antes y luego del último paso de recocido en la fabricación de la oblea, se ven sus mejoras y deficiencias. Se ponen notas a cada diodo y se clasifican los datos en 5 grupos según la calidad de los fotodiodos.

En el capítulo cuatro se hacen ensayos con luz y temperatura para realizar la caracterización de los fotodiodos. Se explica el setup utilizado en las mediciones, y se hacen comparativas de los datos obtenidos.

El último paso en la fabricación es la colocación del coverglass, se vuelven a realizar pruebas térmicas y lumínicas, se calculan los parámetros característicos y se estudia la simetría entre ejes.

En el capítulo cinco se avanza cómo acaba el proceso de ensamblado con la electrónica de control y la carcasa que realiza la Universidad de Sevilla. En los laboratorios del INTA se hacen las últimas pruebas para la calificación del Sensor y se montan en el satélite que se pondrá en órbita en el 2011. Y se exponen las conclusiones finales del proyecto.

### Palabras claves:

caracterización	satélite	clasificación	irradiancia	dos ejes
vector sol	sensor solar	célula solar	control de actitud	FOV



# Índice

## **0 Introducción ... 1**

- 1 Conceptos de dispositivos espaciales ... 1
- 2 Historia y precedentes ... 2
- 3 Objetivos y justificación del proyecto ... 5

## **1 Sensor Solar ... 7**

- 1 Concepto de sensor solar de dos ejes ... 7
- 2 Concepto de sensor solar de dos ejes de alta precisión ... 9
- 3 Célula solar ... 11
  - 1 Aspectos ópticos ... 12
  - 2 Parámetros característicos ... 13
  - 3 Modelo real ... 16
- 4 Proceso de fabricación de oblea ... 17
- 5 Mapeo de la oblea ... 21

## **2 Equipos de laboratorio ... 23**

- 1 Medición a 4 puntas ... 23
- 2 Máquina de puntas ... 24
- 3 Analizador de parámetros de semiconductor ... 26
- 4 Luz solar ... 30
- 5 Simulador solar ... 31
- 6 Piranómetro ... 33

## **3 Clasificación, mediciones ... 35**

- 1 Condiciones de medición ... 36
- 2 Representación ... 38
- 3 Motivos de test ... 31
- 4 Recocido ... 40
- 5 Clasificación de datos ... 43

## **4 Caracterización, mediciones ... 47**

- 1 Configuración de la medición ... 47
  - 1 Calibración del simulador solar ... 47
  - 2 Setup de la medición ... 49
- 2 Mediciones con luz ... 50
  - 1 Variación de áreas ... 50
  - 2 Variación de la irradiancia ... 52
  - 3 Parámetros característicos ... 54
  - 4 Simetría de ejes ... 54
- 3 Mediciones con temperatura en oscuridad ... 55
- 4 Tapadera ... 59
  - 1 Diodo central de eje, luz directa ... 60
  - 2 Diodo extremo de eje, luz parásita ... 61
  - 3 Temperatura, luz y tapadera ... 62
  - 4 Parámetros característicos ... 62
  - 5 Simetría de ejes ... 63

## **5 Producto final y conclusiones ... 65**

- 1 Electrónica asociada ... 65
- 2 Encapsulado ... 66
- 3 Calibración ... 68
- 4 Calificación ... 69
- 5 Mejoras y futuros desarrollos ... 70
- 6 Conclusiones ... 71

## **A Bibliografía ... 75**



# 0 Introducción

Desde sus incipientes inicios, uno de los retos más importantes en la industria aeroespacial cuando un satélite es lanzado al espacio exterior y situado en órbita alrededor de un determinado cuerpo celeste es el de proporcionarle la orientación y el control de seguimiento adecuados para que no pierda el rumbo y no se salga de la órbita. La importancia de que exista este control es tal que sin él numerosos satélites de propósito bien distinto no hubieran podido ser puestos en órbita. Las predicciones meteorológicas, las comunicaciones satélites y los estudios cosmológicos, entre otras facetas, necesitan de específicas orientaciones satelitales atendiendo al blanco objeto de su estudio.



Fig. 0.1 **Satélite en órbita terrestre**

## 0.1 Conceptos de dispositivos espaciales

Para poder realizar el control de posicionamiento y orientación dinámicos de un satélite es indispensable tomar como referencia alguna entidad espacial. Esta dotación satelital es conocida como Control de Actitud de Satélites (*Attitude Control System, ACS*). Para conseguir que este control de actitud dirija con agilidad el satélite se requiere de actuadores que ejerzan los momentos de fuerza adecuados para su reorientación y estabilización de acuerdo a algoritmos establecidos en tierra, una electrónica asociada entre estos actuadores y unos sensores. Estos últimos son los sensores de actitud que miden la posición relativa del satélite y el cuerpo celeste alrededor del cual orbita. Para la fabricación de estos sensores existen diversas tecnologías sobre las que han basado su funcionamiento en algún momento:



Inclinómetros.

Miden la variación del ángulo derivada de la deformación de un metal al estar sometida a las fuerzas de un determinado campo gravitatorio. Son de bajo coste y no son apropiados para posicionamientos rápidos.

Medidores de fluido estabilizado.

Miden la rotación de una espiral en suspensión en un determinado fluido. Son relativamente precisos y tienen un alto coste de mantenimiento.

Unidades de referencia vertical.

Compuestos de un vector de 3 acelerómetros y un vector de 3 giróscopos ortogonales entre sí. Con el uso de un algoritmo miden el movimiento de un objeto. Son de bajo coste y buena precisión.

Sensores solares.

En particular, existen un tipo de sensores que mide el ángulo que forman los haces de sol que inciden sobre dicho sensor en dos ejes de trabajo, objeto de nuestro estudio.

## 0.2 Historia y precedentes

El Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA) desarrolla entre otras actividades la fabricación de satélites. En el año 2004 pusieron en marcha el proyecto *NANOSAT-1B*, basado en el satélite del cual toma su nombre, que requería un sistema de posicionamiento satelital utilizando como referencia el sol. Debido a que el satélite era de pequeñas dimensiones, el dispositivo de posicionamiento tenía que ser de reducido tamaño y peso y con altas prestaciones. De estas exigencias surgió un sensor de luz solar llamado *Vector Sol (VS)*, encargado por el INTA a la Universidad de Sevilla, quien se ocupó del diseño de su electrónica y que encargó a su vez a la Universitat Politècnica de Catalunya la fabricación del dispositivo foto sensor. El VS tenía, entre otras características, una resolución de  $0,2^\circ$ , un FOV de  $\pm 60^\circ$  además de un peso y tamaño pequeños gracias a la naturaleza de su fabricación.



Fig. 0.2 **NANOSAT-1B**



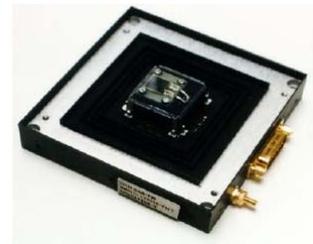
En el mercado actual existen diversos fabricantes y centros de investigación o universidades que comercializan o proponen sensores solares con diferentes prestaciones, que han sido diseñados para ser utilizados en diferentes entornos satelitales de acuerdo a las exigencias requeridas. Todos ellos son sensibles en mayor o menor medida a la reflexión solar, llamado albedo en el argot. Algunas de estas soluciones son:

#### **TNO & BRADFORD ENGINEERING B.V.**

Empresa holandesa con larga experiencia en el desarrollo y producción de sensores ópticos para subsistemas de control de actitud en variedad de misiones espaciales. Su rango de producción cubre desde sensores analógicos de precisión fina y gruesa, hasta sensores digitales de alta precisión y amplio campo de visión para la determinación del ángulo de incidencia del sol. Algunos de los productos ofrecidos por la empresa son:

##### *Sun Acquisition Sensor (SAS).*

Sensor solar analógico de precisión gruesa constituido por cuatro fotodiodos construidos en silicio sobre estructura piramidal y cubiertos de coverglass para alcanzar mayor tolerancia a la radiación. Su ángulo de visión es de  $\pm 90^\circ$  en cada eje, siendo sensible al albedo. Alcanza una precisión de  $\pm 1^\circ$  por eje. Dimensiones: 110x110x28 mm. Peso: 170 g. No incluye etapa de amplificación, conversión ni procesado.



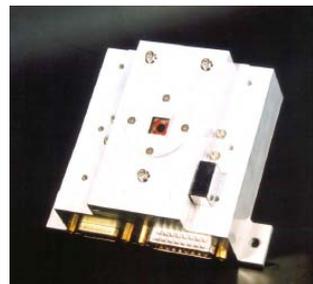
##### *Quadrant Sun Acquisition Sensor (QSAS).*

Sensor solar analógico de precisión fina constituido por cuatro fotodiodos construidos en silicio sobre estructura piramidal y cubiertos de coverglass para alcanzar una mayor tolerancia a la radiación. Emplea una máscara con diafragma para la obtención de mayor precisión. Su ángulo de visión es de  $\pm 90^\circ$  por eje, siendo sensible al albedo. Alcanza una precisión de  $\pm 0.1^\circ$  por eje tras calibración con datos en tierra. Dimensiones: 110x110x30 mm. Peso: 265 g. No incluye etapa de amplificación, conversión ni procesado.



##### *Digital Sun Sensor (DSS)*

Sensor solar digital de precisión fina constituido por un dispositivo APS (Active Pixel Sensor) y una máscara con diafragma para la obtención de mayor precisión. Su ángulo de visión es de  $\pm 60^\circ$  por eje, siendo sensible al albedo. Alcanza una precisión de  $\pm 0.4^\circ$  por eje tras calibración con datos en tierra. Dimensiones: 130x120x55 mm. Peso: 500 g. Incluye etapa de procesado sobre FPGA.



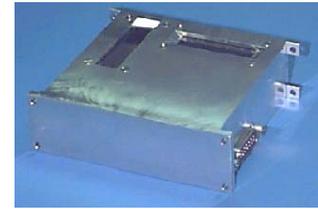


### **SURREY SATELLITE TECHNOLOGIES LTD.**

Empresa inglesa dedicada al diseño, construcción y lanzamiento de pequeños satélites económicos. Fundamenta su línea de producción en la adaptación de éstos a las exigencias ambientales del espacio exterior. Desarrolla, además, subsistemas para la navegación, las comunicaciones y la realización de estudios científicos en misiones espaciales. Entre sus productos destacan también sensores solares, seguidores de estrellas, giróscopos y magnetómetros. Alguno de sus productos son:

#### *SSTL 2-axis DMC Sun Sensor.*

Sensor solar analógico de precisión gruesa constituido por dos pares de fotodiodos cubiertos por una tapadera con dos ventanas ortogonales. Su ángulo de visión es de  $\pm 50^\circ$  en cada eje, siendo sensible al albedo. Alcanza una precisión de  $\pm 1^\circ$  por eje. Dimensiones: 95x107x35 mm. Peso: 300 g. No incluye etapa de conversión ni procesado. Su calibración se realiza mediante función polinomial para la linearización y obtención de los ángulos del sol.



### **SPACEQUEST LTD.**

Empresa norteamericana líder en desarrollo de tecnología avanzada para satélites, tanto para aplicaciones gubernamentales, educacionales o comerciales, mediante el diseño, desarrollo y fabricación de pequeños satélites de baja órbita. Desarrolla principalmente subsistemas de potencia, comunicaciones, control de actitud, manejo de datos y software. Algunos de sus productos son:

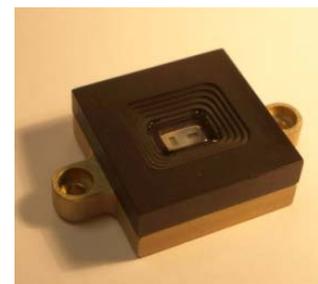
#### *SS-330 Dual Axis Digital Sun Sensor.*

Sensor solar digital de precisión gruesa. Su ángulo de visión es de  $\pm 60^\circ$ , siendo sensible al albedo. Alcanza una precisión de  $\pm 1^\circ$  por eje. Dimensiones: 30x30x17 mm. Peso: 38 g. No incluye etapa de conversión ni procesado. Proporciona como salida el vector solar, el brillo máximo y la temperatura desde un módulo externo a la cabeza sensora.



### **Universidad Politécnica de Cataluña MNT-UPC y Universidad de Sevilla US**

El grupo de MicroTecnologías y NanoTecnologías de la Universidad Politécnica de Cataluña (MNT-UPC) y el grupo de Microsistemas de la Universidad de Sevilla han integrado en el satélite español Nanosat-1B dos tipos de micro sensores solares, uno con salida analógica (VS-A) y otra con salida digital (VS-D). En este último caso, además de la electrónica analógica necesaria para la detección, incorpora un microprocesador tipo PIC. Ambos sensores utilizan como cabeza detectora un dado de silicio provisto monolíticamente de 4





fotodiodos, cada uno de los cuales está dedicado a un eje de medida, una tapadera de vidrio de coverglass, que actúa como barrera protectora frente a la radiación y forma parte activa a su vez del sistema de detección al incorporar en su superficie las rendijas de paso de luz y un cristal protector para el coverglass.

### 0.3 Objetivos y justificación del proyecto

En el presente año el ambicioso INTA pondrá en marcha un nuevo satélite, el INTA $\mu$ SAT, que necesita de un sistema de posicionamiento más preciso que el antiguo Vector Sol creando así el novedoso *Vector Sol Fino* (VSF). Este sensor tiene el mismo principio de funcionamiento que su antecesor pero se distingue por estar compuesto de 12 diodos, 6 dispuestos en un eje y otros 6 en otro eje ortogonalmente entre sí, encargados de medir dos de los ángulos proyectados por los rayos incidentes y el plano del sensor. Además tiene la particularidad de que todos los fotodiodos que lo componen han sido fabricados simultáneamente en el mismo ciclo de fabricación y es monolítico, es decir, están integrados en la misma porción de oblea. Las especificaciones que debe cumplir el VSF son: una resolución de 0,01°, un FOV de  $\pm 60^\circ$ , un consumo inferior a 5 Mw., un peso menor a 1 g y un volumen en torno a 0,5 cm<sup>3</sup>.

Para poder cubrir los 360° de visión del sol el INTA $\mu$ SAT incorporará 3 sensores VSF dispuestos alrededor de sus caras.

El proyecto que se presenta en esta memoria tiene como objetivo global la caracterización eléctrica de sensores VSF. Estos sensores formarán parte del sistema de control de Actitud del satélite INTA $\mu$ SAT. Como resultado del proyecto se obtienen sensores para realizar las pruebas físicas, de ingeniería (Modelo denominado de *Ingeniería*) como paso previo a los modelos de *Calificación* y de *Vuelo*

Para la obtención de este objetivo han sido necesarios llevar a término las siguientes tareas las cuales llevan asociadas el orden cronológico de su consecución:

#### I) Conocer el entorno de caracterización (Primer mes)

Ha sido indispensable la familiarización de los equipos de laboratorio utilizados para poder realizar la clasificación y posterior caracterización de los sensores como son los analizadores de semiconductor, el simulador solar, la máquina de puntas, y los sistemas de control de temperatura.

#### II) Comprender el funcionamiento de los dispositivos fotovoltaicos a caracterizar, sus parámetros característicos y su proceso de fabricación (Primer mes)

Se ha tenido que realizar un estudio pormenorizado del principio de funcionamiento de los sensores, conocer los parámetros que los caracterizan y entender su proceso de fabricación a partir de la oblea de silicio.



### III) Estudio de fiabilidad: clasificación de los dispositivos fabricados (Segundo mes).

Para ello ha sido necesario primeramente realizar una serie de mediciones en la oscuridad de los 12 fotodiodos de cada una de los 32 dispositivos producidos (dados) antes de su recocido. Posteriormente, se realizó una segunda serie de medidas de 13 dados después de su recocido y en la oscuridad. Por último, en base a los resultados obtenidos, se estudiaron las gráficas obtenidas y fueron clasificados los dispositivos en base a unos criterios definidos.

### IV) Medidas bajo luz con espectro solar extraterrestre AM0 y terrestre AM1,5G (Tercer y cuarto mes).

Se han realizado mediciones bajo luz de cada uno de los diodos de los 13 dados con el propósito de caracterizar su influencia lumínica en diferentes estándares espectrales. Para su alcance ha sido necesario realizar un estudio comparativo de las mediciones con y sin tapadera, con y sin máscara y con y sin protector.

### V) Estudio térmico (influencia de la temperatura en las características eléctricas y su efecto en las propiedades físicas). Estudio de fiabilidad. (Quinto mes)

También se ha realizado una caracterización para ver la influencia de la temperatura desde 225° hasta la temperatura ambiente, En particular, se ha observado cómo varían sus parámetros característicos.

Las 3/4 partes de la duración del presente proyecto han tenido lugar en el Laboratorio de Caracterización L-105 del departamento de Electrónica que se encuentra en el Campus Nord (edificio C5) de la UPC.

Para poder plasmar este trabajo que corresponde al Proyecto Final de Carrera de la titulación Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad Sistemas Electrónicos se ha elaborado la presente memoria entre el quinto y sexto mes.

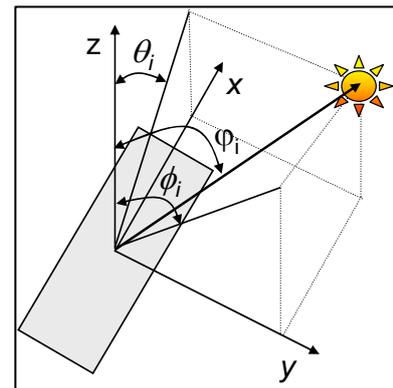


# 1 Sensor solar

## 1.1 Concepto de sensor solar de dos ejes

El Vector Solar es aquel formado desde el sistema de medición hasta el sol, del cual sólo interesa medir el ángulo  $\phi_i$  que forma con respecto al eje z (ángulo cenital si estamos en la superficie terrestre). Para ello se miden dos ángulos, los formados por las proyecciones ortogonales en el plano zx y el eje z,  $\theta_i$ , y la del plano zy y el eje z,  $\phi_i$ ; la relación entre estos tres ángulos está regida por la siguiente ecuación:

$$\text{tg}^2(\varphi_i) = \text{tg}^2(\theta_i) + \text{tg}^2(\phi_i) \quad [\text{E 1.1}]$$



El sensor solar consiste en un par de ventanas ortogonales que dejan pasar la luz solar iluminando a dos fotodiodos centrados en cada ventana. El principio de funcionamiento se basa en la variación de las corrientes fotogeneradas en los diodos al desplazarse el área iluminada que es función de la inclinación del sol.

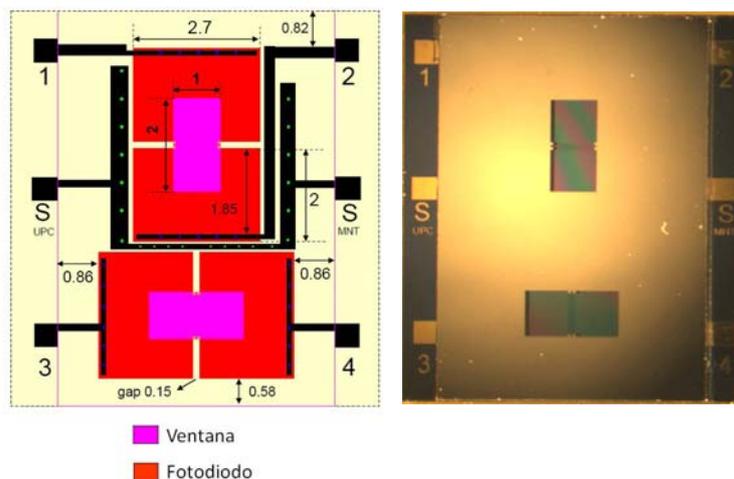
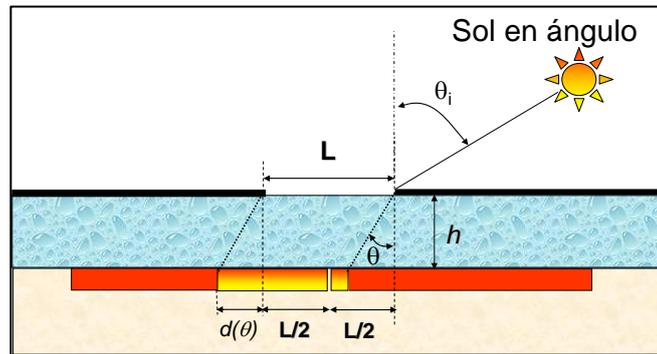


Fig. 1.1 Layout y foto del Vector Sol



A continuación se analiza el funcionamiento de un eje que es análogo al otro eje ortogonal.



De acuerdo con la Ley de Snell:  $n_{\text{aire}} \cdot \text{sen}(\theta_i) = n_{\text{cristal}} \cdot \text{sen}(\theta)$  donde  $n$  es el índice de refracción, se relacionan los ángulos de incidencia y refractado.

$$I_{ph1} = K \cdot A_1(\theta) \cdot S_m(\theta_i) = K \cdot W \cdot \left( \frac{L}{2} + \text{tg}(\theta) \cdot h \right) \cdot \cos(\theta_i) \cdot SC \cdot \varepsilon(J) \quad [E 1.2]$$

$$I_{ph2} = K \cdot A_2(\theta) \cdot S_m(\theta_i) = K \cdot W \cdot \left( \frac{L}{2} - \text{tg}(\theta) \cdot h \right) \cdot \cos(\theta_i) \cdot SC \cdot \varepsilon(J)$$

donde  $K$  [A/W] es el parámetro de conversión de potencia en corriente, el cual depende del proceso de fabricación. El área iluminada en los fotodiodos,  $A(\theta)$ , es igual al producto del ancho de la ventana ( $W$ ) y la mitad del largo ( $L/2$ ) más/menos una distancia proporcional a  $\theta$ ,  $d(\theta) = \text{tg}(\theta) \cdot h$ . La irradiancia normal,  $S(\theta)$ , es igual al producto de la Constante Solar ( $SC$ ), el coseno del ángulo incidente ( $\theta_i$ ) y el coeficiente de excentricidad orbital terrestre ( $\varepsilon$ ) que depende de  $J$  siendo éste el día en el calendario Juliano.

Se deduce que las que la corrientes fotogeneradas son proporcionales a la componente normal de la irradiancia y al área iluminada. Estos dos parámetros varían con el ángulo de incidencia.

Para que las mediciones no dependan de los factores de fabricación, de los materiales y de variaciones de la irradiancia se define la función Diferencia Relativa,  $R(\theta)$ :

$$R(\theta) = \frac{I_{ph1} - I_{ph2}}{I_{ph1} + I_{ph2}} = \frac{A_1(\theta) - A_2(\theta)}{A_1(\theta) + A_2(\theta)} = \frac{2 \cdot h}{L} \cdot \text{tg}(\theta) \quad \text{para } -1 \leq R(\theta) \leq 1 \quad [E 1.3]$$

donde  $2h/L = G$  es la ganancia geométrica.

De forma análoga se define  $R(\Phi)$  del otro eje ortogonal. La determinación de los ángulos incidentes ( $\theta_i$  y  $\Phi_i$ ) necesitan de la correlación de las funciones  $R(\Phi)$  y  $R(\theta)$  ya que la ley de Snell se define para el ángulo del vector solar y no es lineal para las proyecciones ortogonales medidas.



## 1.2 Concepto de sensor solar de dos ejes de alta precisión

Se define el rango de trabajo FOV (Field Of View) del Vector Sol como el intervalo de ángulos para el cual la función  $R(\theta)$  está comprendida entre -1 y 1; fuera de este rango la ventana sólo permite iluminar un fotodiodo de manera que la función satura a  $\pm 1$  y no se puede determinar el ángulo de incidencia.

En particular, se ha requerido un FOV para el Vector Sol de  $\pm 60^\circ$ , teniendo en cuenta la ley de Snell y que el  $n_{\text{aire}}=1$  y el  $n_{\text{cristal}}=1,49$  se obtiene un FOV de diseño de  $\pm 36^\circ$ .

La precisión dependerá de la calidad del conversor y de la relación S/N de las corrientes fotogeneradas medidas.

Para aumentar la precisión se necesita aumentar G y en consecuencia, disminuye el FOV para evitar la saturación de  $R(\theta)$ .

Como solución a este problema se recurre a la sectorización del FOV dividiéndolo en N sectores iguales obteniendo:

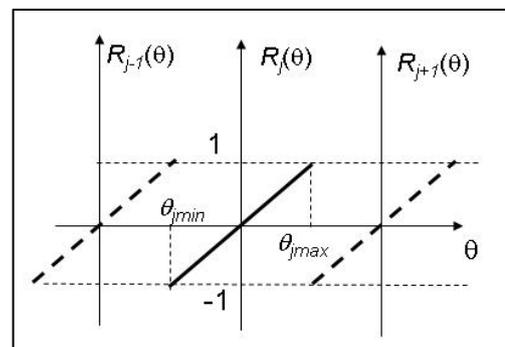
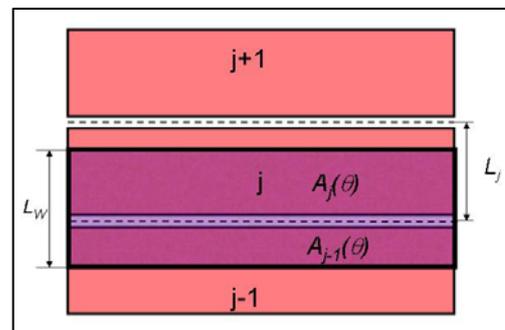
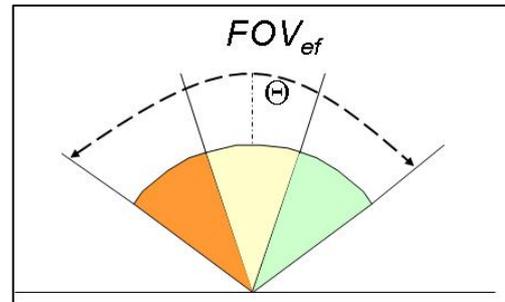
$$\Theta = \frac{FOV_{ef}}{N} \quad [E 1.4]$$

Por cada uno de estos sectores entran en funcionamiento un par de fotodiodos. La cantidad de fotodiodos de cada eje del sensor solar es igual a  $N+1$ .

La luz que entra por la ventana se desplaza por los fotodiodos iluminando a dos contiguos simultáneamente.

$$R_j(\theta) = \frac{I_{phj} - I_{ph_{j-1}}}{I_{phj} + I_{ph_{j-1}}} = \frac{A_j(\theta) - A_{j-1}(\theta)}{A_j(\theta) + A_{j-1}(\theta)} \quad [E 1.5]$$

En el momento que R satura se hace el cambio de pares de fotodiodos iluminados, trabajando así con una nueva R no saturada.





Con el objetivo de aumentar las prestaciones del Vector Sol se diseña el Vector Sol Fino. En la siguiente tabla de parámetros se comparan los parámetros de diseño:

	<b>Vector Sol</b>	<b>Vector Sol Fino</b>
FOV (FOVcrystal)	$\pm 60^\circ (\pm 36^\circ)$	$\pm 60^\circ (\pm 36^\circ)$
Resolución	0,15°	0,01°
G (L;h)	0,4 (2mm ; 0,4mm)	6 (1,1mm ; 3,3mm)
Rango dinámico de R	$\pm 0,29$	$\pm 0,97$
Sectores FOV	1	5

La topología del Vector Sol Fino contempla 6 fotodiodos para el eje x y otros 6 para el eje y, con un FOV en 5 sectores, necesarios para conseguir la resolución deseada.

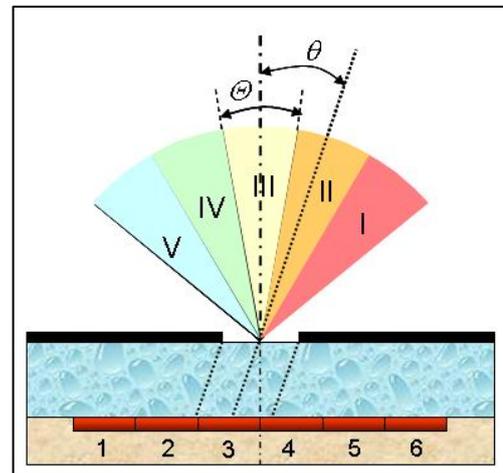
En el sector I los fotodiodos iluminados son el 1 y el 2 y se encargan de los valores de  $\theta$  comprendidos entre los  $21,6^\circ$  y  $36^\circ$ .

En el sector II trabajan los fotodiodos 2 y 3 para  $\theta$  entre  $7,2^\circ$  y  $21,6^\circ$ .

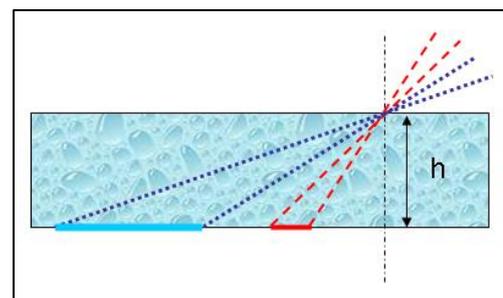
En el sector III funcionan los fotodiodos 3 y 4 para  $\theta$  entre  $-7,2^\circ$  y  $7,2^\circ$ .

En el sector IV funcionan los fotodiodos 4 y 5 para  $\theta$  entre  $-21,6^\circ$  y  $-7,2^\circ$ .

Por último, en el sector V trabajan los fotodiodos 5 y 6 para  $\theta$  entre  $-21,6^\circ$  y  $-36^\circ$ .



Se observa como a medida que se aleja el área iluminada del centro va aumentando proporcionalmente a la tangente de  $\theta$ , por lo que el largo de los diodos tiene que ir aumentando para mantener la región de FOV activa. Esta longitud ha sido construida un poco menor que la calculada de manera que serán iluminados 3 fotodiodos para obtener un solapamiento de las funciones R y así no tener discontinuidades para el cálculo del ángulo incidente.



Los fotodiodos centrales tienen la ventana situada justo encima, de manera que hay que sumarle la mitad de ésta al largo de diseño.



Como resultado final se obtiene el Vector Sol Fino en cuyo layout se indica en color rojo los fotodiodos, las áreas de color rosa son las ventanas de entrada de luz, los rectángulos amarillos en los bordes son los pads de contacto y entre los pads y los fotodiodos están las pistas que conectan ambos elementos.

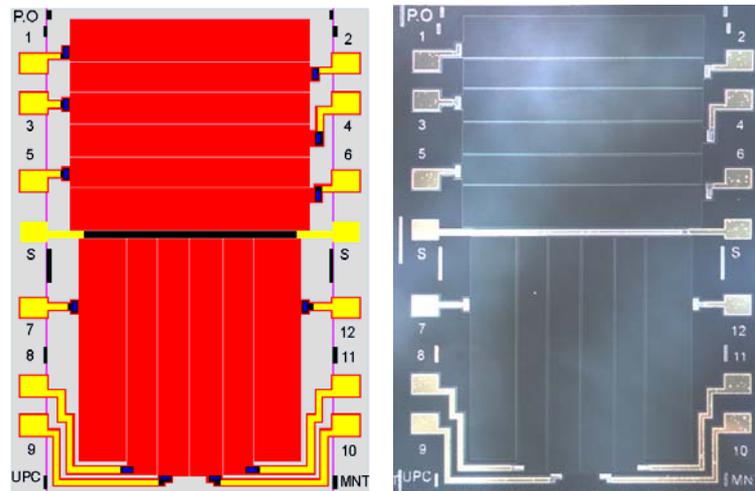


Fig. 1.2 Lay Out y foto del Vector Sol Fino

### 1.3 Célula solar

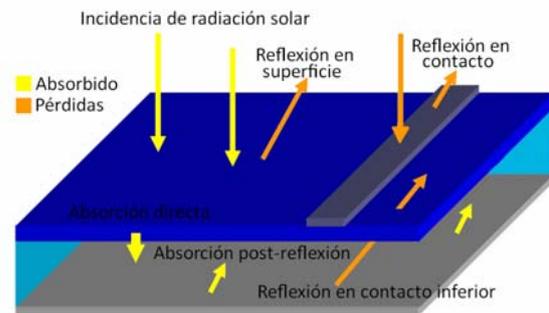
Desde un punto de vista eléctrico un fotodiodo tiene las mismas características que una célula solar. Sin embargo, la velocidad de recombinación de portadores es más lenta que en un fotodiodo, el área suele ser mayor y tiene respuesta a un rango más amplio de longitudes de onda. Todos estos factores hacen que la célula solar tenga una mayor fotogeneración de corriente. Por ello, se han fabricado pequeñas células solares tanto en el VS como en el VSF en lugar de fotodiodos.

Una célula solar es un dispositivo fotovoltaico en la que la radiación incidente proviene del sol. Está fabricada en una oblea de silicio donde la unión semiconductor es toda el área de la oblea con una serie de estrechos contactos metálicos dispuestos a la largo de su superficie frontal y una capa metálica es el contacto inferior. El efecto fotovoltaico sobre el cual se basa consiste en la transformación de la energía solar (haces de fotones) en energía eléctrica (electrones).

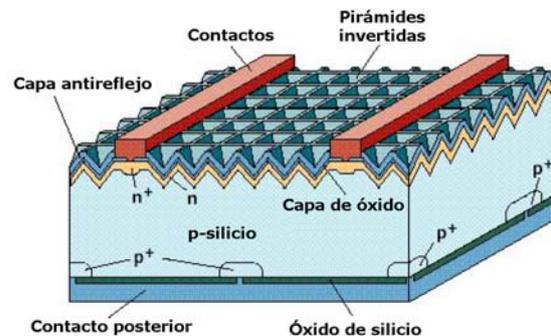


### 1.3.1 Aspectos ópticos

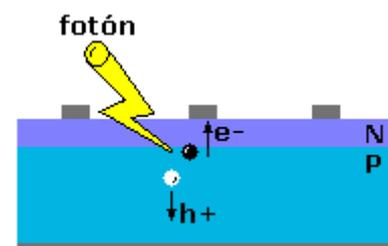
Tanto la naturaleza física del silicio como el diseño de la célula solar contribuyen a que existan pérdidas ópticas en el dispositivo fabricado. El silicio es un material reflectante que actúa como un espejo ante la incidencia de la luz solar y refleja, por tanto, una parte de la misma. El área de los contactos de la célula produce una sombra en su superficie que no permite que una parte de la luz incidente sea absorbida. Estas pérdidas impiden que todos los fotones incidentes generen pares de electrón-hueco y por tanto, deben ser minimizadas



Con el objetivo de conseguir células solares de alto rendimiento, que absorban la mayor cantidad de fotones incidentes, se incorporan soluciones en su proceso constructivo. Por un lado, se utilizan películas antirreflejo en la superficie de la célula. La capa antirreflectante es de material dieléctrico con un grosor y un índice de refracción adecuados para evitar al máximo el reflejo. Por otro lado, en la cara posterior se deposita una capa de metal antirreflectante y pasivada por el óxido de silicio que minimiza la recombinación de fotones en el interior de la célula. Por último, se texturiza la superficie para poder captar de manera más eficiente la luz incidente. El proceso de texturización consiste en la construcción de pequeñas pirámides invertidas mediante un ataque químico selectivo sobre el silicio. Esta modificación geométrica permite reorientar los haces de luz hacia el interior de la célula modificando el ángulo de incidencia y, por tanto, aumentar así la distancia recorrida por los fotones y la probabilidad de que éstos sean absorbidos.



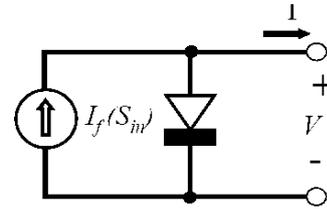
Los haces de fotones que son absorbidos por el silicio atraviesan la capa más delgada (zona de difusión N) y son colectados en el seno de la célula (zona P). Cuando la energía del fotón es mayor a la energía del gap del silicio, que es la resta de energías que hay entre la banda de conducción y la banda de valencia, genera un par electrón-hueco y la diferencia de energía sobrante si es mayor vuelve a generar otro electrón-hueco de manera iterativa hasta que la energía restante sea inferior a la del gap, que se disipará en forma de calor. Los portadores generados en la zona P son separados por el campo eléctrico de la unión P-N, de manera que los electrones son colectados hacia la zona N generando así la corriente eléctrica.





### 1.3.2 Parámetros característicos

La ecuación de funcionamiento  $I(V)$  de la célula solar nos da la característica I-V que resulta de la superposición de las ecuaciones en oscuridad y con luz. Este comportamiento se puede modelar de acuerdo a una fuente de corriente en paralelo con un diodo que nos proporciona el modelo de la célula ideal.



$$I(V, S_{in}) = I_f(S_{in}) - I_0 \cdot [e^{V/V_r} - 1] \quad [E.1.6]$$

donde  $S_{in}$  es la irradiancia solar e  $I_f$  la corriente fotogenerada. El segundo término corresponde a la componente de la corriente en la oscuridad

A continuación se presenta las curvas de características de una célula solar, teniendo en cuenta el sentido convencional de circulación de corriente en un diodo.

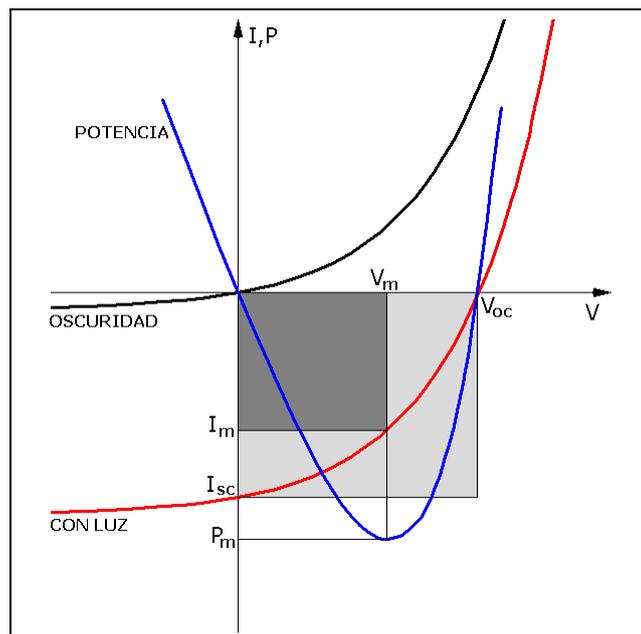


Fig. 1.3 Parámetros característicos

Los principales parámetros eléctricos de una célula solar con los que se caracteriza la calidad de los dispositivos fabricados son:



**Corriente de cortocircuito,  $I_{sc}$**

Es la intensidad de corriente que circula por la célula solar cuando la tensión es 0 y está expuesta a una iluminación constante y determinada para una temperatura.

Su valor es proporcional a la energía solar absorbida y al área expuesta a la luz. Su variación es despreciable con la temperatura.

$$I_{sc} = I_f = A \cdot J_f = A \cdot \frac{J_{fr}}{S_{inr}} \cdot S_{in} \quad [E 1.7]$$

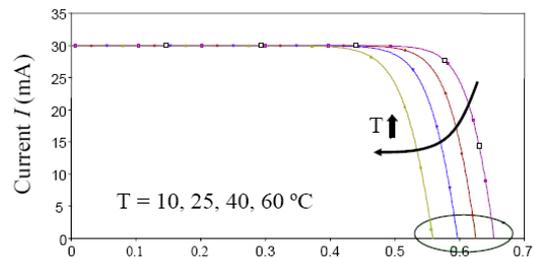
donde  $J_{fr}$  depende de la tecnología de fabricación y  $S_{inr}$  es la irradiancia relativa.

**Tensión de circuito abierto,  $V_{oc}$**

Es la diferencia de potencial que hay en bornes de la célula cuando la corriente de cortocircuito es 0 y está expuesta a una iluminación constante y fija para una determinada temperatura. Su valor tiene dependencia logarítmica con la irradiancia y no depende del área del dispositivo.

$$V_{oc} = V_T \cdot \ln\left(1 + \frac{I_f}{I_o}\right) = V_T \cdot \ln\left(1 + \frac{J_f}{J_o}\right) \approx \frac{K \cdot T}{q} \cdot \left(\frac{J_{sc}}{J_o(T)}\right) \quad [E 1.8]$$

La temperatura tiene una fuerte influencia sobre  $V_{oc}$  decrementando su valor al aumentar la temperatura, aproximadamente  $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ .



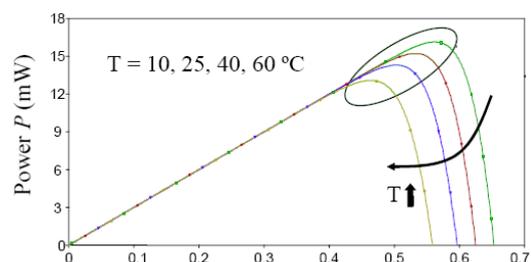
**Punto de Máxima Potencia, PMP**

Es el punto de trabajo cuando la potencia que entrega la célula solar a la carga es la máxima. Cuanto más cerca trabaje de este punto más eficiente será el sistema.  $V_m$  e  $I_m$  es el punto I-V donde se da la potencia máxima.

$$P_m = V_m \cdot I_m = V_m \cdot \left[ I_f - I_o \cdot \left( e^{V_m/V_T} - 1 \right) \right] \quad [E 1.9]$$

$V_m$  se puede calcular resolviendo la ecuación:  $V_{oc} = V_m + V_T \cdot \ln\left(1 + \frac{V_m}{V_T}\right)$  [E1.10]

Debido a que la tensión varía con la temperatura también lo hará la potencia afectando así al PMP, decrementando su valor cuando la temperatura aumenta.





### Factor de Forma, FF

Es un parámetro que indica el grado de similitud entre la célula solar y una fuente de corriente. Está expresado en % y cuanto más grande sea su valor mayor calidad tendrá la célula, es la relación entre las áreas de los rectángulos que determinan  $V_{OC} \times I_{SC}$  y  $V_m \times I_m$ .

$$FF(\%) = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \cdot 100 \quad [E 1.11]$$

### Rendimiento de conversión fotovoltaico

Es la relación entre la potencia máxima entregada (PMP) por la célula bajo iluminación y la potencia de luz incidente. Suele medirse en condiciones estándar de medida (STC):  $AM1.5$ ,  $1 \text{ KW/m}^2$ ,  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$\eta(\%) = \frac{P_m}{P_{in}} \cdot 100 = \frac{V_m \cdot I_m}{A \cdot S_{in}} \cdot 100 = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{A \cdot S_{in}} \cdot 100 \quad [E 1.12]$$

### Eficiencia cuántica

Es el cociente entre el número de portadores colectados y el número de fotones incidentes para una longitud de onda determinada.

$$QE(\lambda) = \frac{J_f}{q \cdot \phi_o(\lambda)} \quad [E 1.13]$$

### Respuesta espectral

Es el cociente entre la corriente fotogenerada por la célula bajo una luz monocromática con una longitud de onda concreta y el valor de irradiancia espectral para esa longitud de onda. Es un parámetro que indica en qué longitudes de onda la célula solar es más eficiente

$$SR(\lambda) = \frac{J_f}{S_{in}(\lambda)} \quad [A/w] \quad [E 1.14]$$

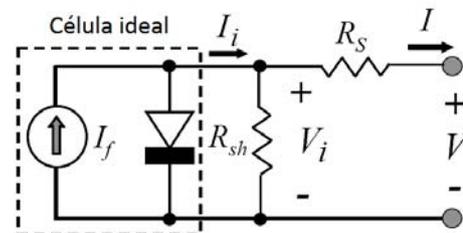


### 1.3.3 Modelo real

En la realidad, hay que considerar que la célula solar presenta una serie de no idealidades que repercuten en la corriente fotogenerada, que será menor que la corriente fotogenerada en un célula ideal. Estas pérdidas son debidas a sus limitaciones ópticas y a sus resistencias internas. Las limitaciones ópticas son provocadas por: la sombra de las áreas metalizadas o factor de metal ( $f_m$ ), reflectancia de la superficie  $R(\lambda)$ , no absorción de fotones,  $FA(\lambda)$  y recombinación de fotones,  $IQE(\lambda)$ . Por ello, se recalcula la ecuación de la corriente fotogenerada,  $I(\lambda)$  resultando que:

$$I_f = A \cdot q \cdot \phi_{in} \cdot EQE(\lambda) = A \cdot q \cdot \phi_{in} \cdot (1 - f_m) \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot FA(\lambda) \cdot IQE(\lambda) \quad [E 1.15]$$

Las resistencias internas de la célula solar pueden modelarse como una resistencia en serie y una resistencia en paralelo. La resistencia paralelo engloba las fugas de corriente que se producen en la periferia del dispositivo resultado de una fabricación no perfecta. Su impacto en el rendimiento no es tan grande como la de la resistencia serie. Afecta en mayor grado al cálculo de la PMP y en menor medida a  $V_{oc}$ .



La resistencia serie engloba las resistencias de los contactos metal-semiconductor de las zonas de difusión N y de sustrato P y las resistencias de los caminos de metalización por lo que cuanto más óptimo sea el diseño de los contactos y de la zona de difusión más eficiente será la célula solar.

Así pues, la ecuación de la característica I-V real queda definida como:

$$I(V) = I_f(S_{in}) - I_o \cdot \left( e^{(V+R_s \cdot I)/V_r} - 1 \right) - \frac{R_{sh}}{V} \quad [E 1.16]$$

Para mejorar su eficiencia debe optimizarse el diseño de los contactos de tal forma que generen la mínima área de sombra posible en la parte activa de la célula, texturizar la superficie de la célula e incorporar una capa antirreflectante tal y como se ha explicado en el apartado 1.3.1.



## 1.4 Proceso de fabricación de oblea

La fabricación del Vector Sol Fino (VSF) es la misma que se utilizó para la fabricación del antiguo Vector Sol, ya que ha dado resultados eléctricos muy buenos. Se intentó fabricar el VSF con un proceso más simplificado pero no obtuvo los resultados esperados ya que el metal de los contactos penetró en el sustrato poniendo en corto circuito los diodos.

La fabricación de la oblea fue realizada en la sala blanca del Campus Nord de la UPC de Barcelona, por el profesor Ing. Pablo Ortega.

La oblea utilizada para la fabricación del VSF es de silicio monocristalino tipo P (c-Si P). Tiene un diámetro de 4" pulida por ambas caras y un grosor de 300 $\mu$ m.

A continuación se explican brevemente los subprocesos de la elaboración de la oblea graficando una sección donde se observan la fabricación de dos fotodiodos.

Es necesario en primer lugar realizar una limpieza de la superficie de la oblea. Consistirá en la eliminación de la contaminación orgánica de la superficie y de los metales pesados. El primer acometido se efectuara con la ayuda de una mezcla de agua desionizada, agua oxigenada y amoniaco a temperatura de 70°C. El segundo acometido, se efectuara con agua oxigenada y acido clorhídrico a la misma temperatura. Durante esta limpieza crece una capa de oxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) que hay que eliminar mediante un ataque de ácido fluorhídrico.

### *Oxidación Térmica.*

Aumentando la temperatura y enriqueciendo el oxígeno del ambiente se consigue acelerar el crecimiento de óxido en la superficie (Oxidación seca) o bien con vapor de agua (Oxidación húmeda). El oxidante se difunde a través del

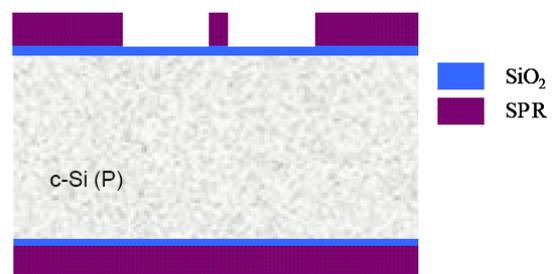


óxido de silicio llegando al silicio incrementando así la capa de óxido. Esta capa de óxido se utiliza de barrera frente a la difusión de las impurezas tipo N de Fósforo.

### *Fotolitografía zona activa.*

Es una técnica en la que se transfiere el diseño grafico de una máscara a la oblea por medio de luz. La zona activa es el espacio en el que se difunde el dopado N para crear el diodo.

Previamente mediante el método del centrifugado de una gota de fotorresina (SPR) en el centro de la oblea y con una determinada



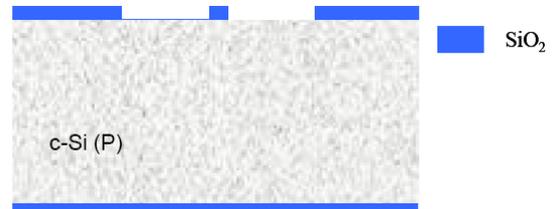
velocidad de revolución se obtiene una película uniforme con el grosor deseado. Luego se recuece la resina en una plancha caliente. La deposición de resina se realiza en ambas caras de la oblea.



A continuación se alinea la máscara con la oblea, se adhiere por contacto y se vela con luz ultravioleta. Luego con un ataque con revelador se eliminan aquellas partes expuestas a la luz (fotorresina positiva).

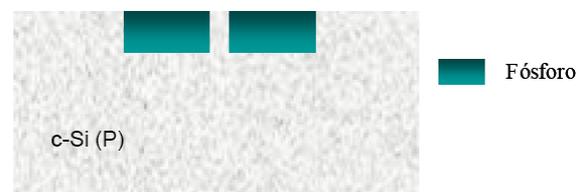
*Ataque al óxido. Limpieza de resina.*

Se elimina el óxido de las zonas activas mediante inmersión de la oblea en ácido. Posteriormente se elimina la resina que ha protegido al óxido con acetona, isopropanol o etanol.



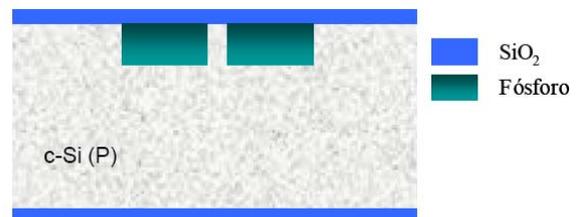
*Difusión de fósforo. Ataque al vidrio y óxido.*

Se introduce en un horno la oblea y el fósforo, el cual se volatiliza y penetra por las ventanas de óxido en la oblea creando así una zona PN. Se suprime la capa de vidrio de fósforo generada sobre el óxido y se quita el óxido de protección.



*Pasivación de superficies*

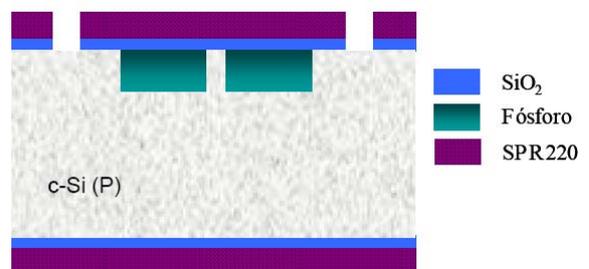
Tiene como objetivo conseguir que la oblea tenga una baja recombinación superficial de portadores, es decir, que la velocidad de recombinación de los electrones y los huecos sea lo más baja posible. Además, el elevado índice de refracción del silicio hace necesaria la aplicación de un tratamiento antirreflectante en la cara superior de la oblea con el fin de disminuir las pérdidas por reflexión. Para tal fin se hace crecer una capa de óxido de silicio que tiene la propiedad de ser antirreflectante y dieléctrica.



*Fotolitografía para la difusión de zona P<sup>+</sup>.*

*Ataque al óxido*

Previo a la metalización de los contactos se realiza una difusión de boro (P<sup>+</sup>) para conseguir una mayor conductividad. Se realiza el proceso de fotolitografía con la máscara para el boro y se ataca el óxido dejando al descubierto el silicio por donde el boro será difundido.



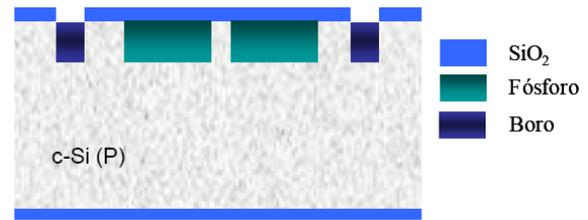


*Limpieza de resina.*

*Difusión de boro y limpieza del vidrio de boro.*

Se vuelve a eliminar la fotorresina con acetona o isopropanol.

Se introduce en un horno la oblea y el boro, el cual se volatiliza y penetra por las ventanas de óxido en la oblea creando así una zona P<sup>+</sup>P. Se limpia el vidrio generado con ácido fluorhídrico.

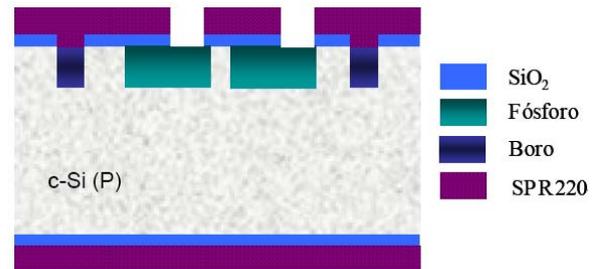


*Fotolitografía de contactos de zona activa*

*Ataque al óxido.*

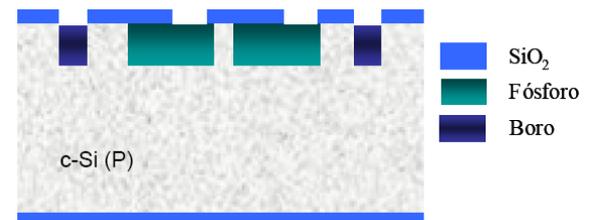
Por último, es necesaria la creación de ventanas en la zona activa para la metalización de los contactos mediante la fotolitografía.

Se ataca la capa de óxido presente en la zona donde se difundirá posteriormente el metal.



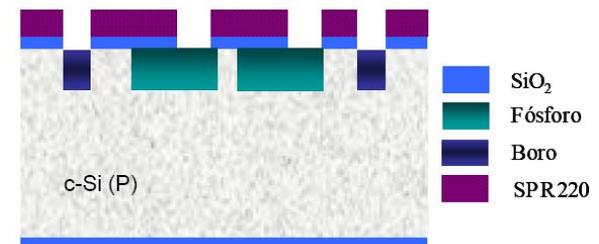
*Limpieza de resina.*

Se retira la resina mediante acetona, isopropanol o etanol.



*Fotolitografía de contactos*

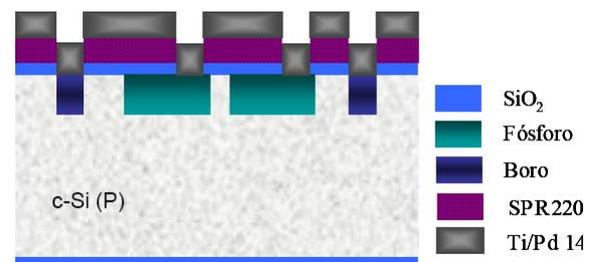
Se vuelve a colocar resina en la capa superior y se crean las ventanas para los contactos metálicos tanto de la zona activa como de la base.



*Metalización de titanio y platino.*

Tanto el depósito de titanio como el de platino se realiza mediante la técnica de Sputtering; consiste en el bombardeo de iones positivos de un gas pesado sobre el metal que tiene potencial negativo desprendiendo sus átomos que se depositan encima de la oblea.

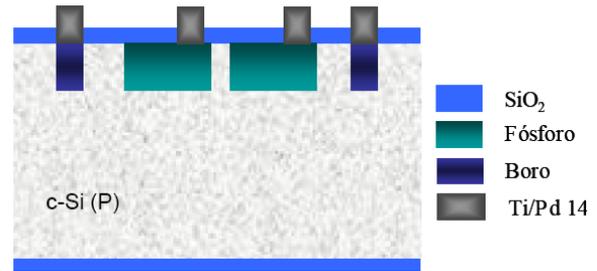
El titanio tiene la propiedad de tener muy buena adherencia con el sustrato y el platino hace de barrera para la futura deposición de oro.





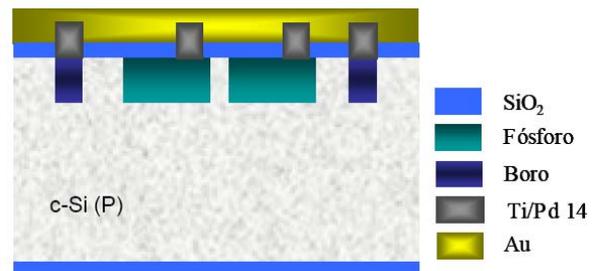
*Lift-Off*

Consiste en la eliminación de titanio y platino en aquellas zonas donde no haya pistas de conexión o contactos. Para ello, se sumerge la oblea en acetona la cual reacciona con la resina eliminándola así como los metales adheridos a ella. Para acelerar este proceso se pueden usar ultrasonidos leves.



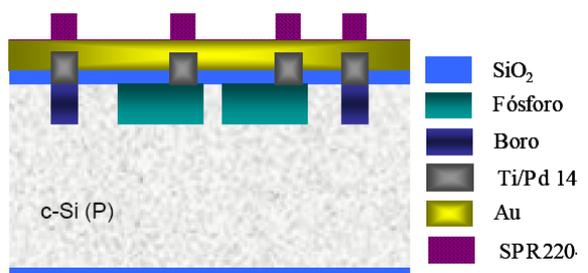
*Metalización de oro.*

Como el titanio y el platino tienen alta resistividad se sitúa oro encima de ellos mediante la técnica de Sputtering ya que es un metal muy conductor y de gran resistencia a la oxidación y otros agentes ambientales.



*Fotolitografía de oro.*

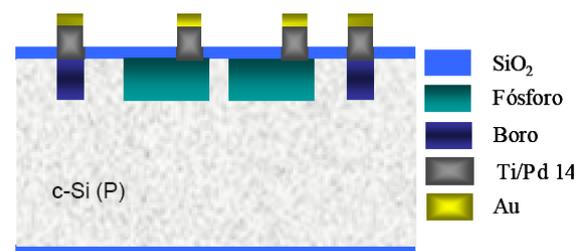
Mediante un nuevo proceso de fotolitografía se protegen las zonas de oro para los contactos y pistas.



*Ataque al oro. Limpieza de resina.*

Se procede a eliminar el oro restante en la oblea mediante un ataque húmedo. Y se elimina la resina.

El proceso de fabricación concluye y la oblea ya está construida.



*Coverglass y pegado.*

Para proteger el dispositivo de las radiaciones extraterrestres y de la luz ultravioleta, se escoge un vidrio especial sobre el cual se deposita resina y mediante un proceso de fotolitografía se deja resina sólo en los espacios de las ventanas por donde entrará la luz solar. Posteriormente se deposita titanio y paladio en la superficie del vidrio, por último, al limpiar la resina se elimina el metal de las zonas de las ventanas mediante el proceso de Lift- Off. Se obtiene así la tapadera o *Coverglass* que dejará pasar una pequeña parte de la radiación solar incidente. Posteriormente se realiza el pegado del *Coverglass* con pegamento epoxi no conductor, transparente y certificado para aplicaciones aeroespaciales.



## 1.5 Mapeo de la oblea

En el proceso de fabricación los dispositivos fueron construidos de forma matricial en la oblea con el objeto de obtener el mayor número de ellos. Del resultado de este reparto se obtienen 32 dados, donde cada de ellos contiene los 12 fotodiodos y una serie de motivos de test dispuestos en la periferia de la oblea donde no hay dados, que sirven para poder calcular diferentes parámetros resistivos. Para poder nombrar cada dado se realiza una codificación de los mismos. El proceso de corte de los dados se realiza en el Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona (CNM)

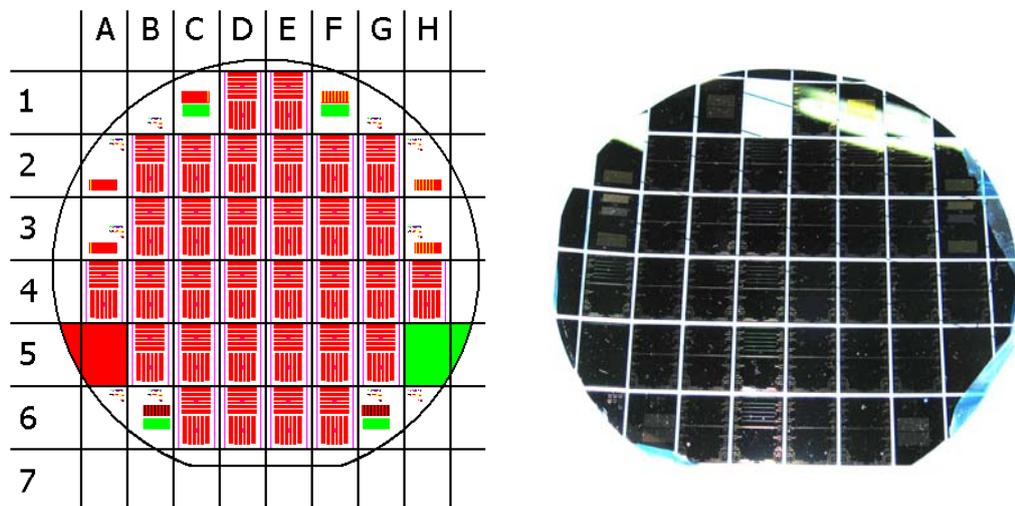


Fig. 1.4 Layout y foto de la oblea



## 2 Equipos de laboratorio

Se presentan los equipos utilizados para la caracterización de los dispositivos fotovoltaicos presentes en el Laboratorio de Caracterización del Departamento de Ingeniería Electrónica del Campus Nord de la UPC de Barcelona. Se explica brevemente teoría de los conceptos necesarios para la utilización de las maquinarias.



Fig. 2.1 Laboratorio de Caracterización - L108 UPC Campus Nord

### 2.1 Método de Kelvin: medición a 4 puntas

Resulta conveniente utilizar una medida de corriente y tensión por separado sobre la muestra cuando la resistencia a medir es del orden de las correspondientes a los cables del sistema de medición o la resistencia de contacto es elevada y se requiere cierta precisión en la medida.

En el siguiente esquema el *force* es el terminal por donde el instrumento inyecta el estímulo al dispositivo ya sea tensión o corriente y el *sense* es el terminal por donde se mide la tensión.

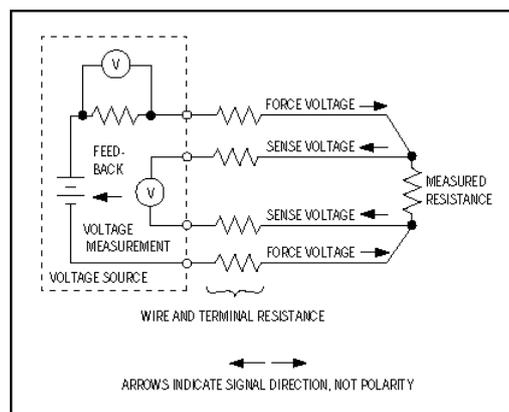


Fig. 2.2 Metodo de 4 puntas



Considerando que la corriente a través del voltímetro es despreciable, dado que su resistencia es del orden de varios  $M\Omega$ , la caída de tensión en la resistencia de contacto y cable *sense* quedan despreciadas, por lo que el valor acusado por el voltímetro es real.

Un control realimentado ajusta la fuente de alimentación para que el voltímetro mida sobre el dispositivo el valor configurado por el usuario. Por medio de un amperímetro (resistencia calibrada en paralelo con un voltímetro) se mide el valor de corriente inyectada en la medición, que será independiente de las resistencias del cable y de contacto.

De esta forma la medición queda liberada de la longitud de los cables y de la alta resistencia de conexión ya que el contacto del terminal del dispositivo es ortogonal a la sonda de medición y por tanto el área es muy pequeña.

## 2.2 Máquina de puntas

Es el banco de trabajo que sirve para realizar las mediciones, una vez fabricada la oblea, necesarias para comprobar el correcto funcionamiento y caracterización de los dispositivos.

La oblea se coloca físicamente en el shuck que hace de base. En la periferia hay una plataforma donde se colocan las puntas que pinchan la oblea y un brazo con un microscopio facilita la visión para el pinchado. Las puntas van conectadas al analizador paramétrico de semiconductores que es el equipo de realiza las mediciones.

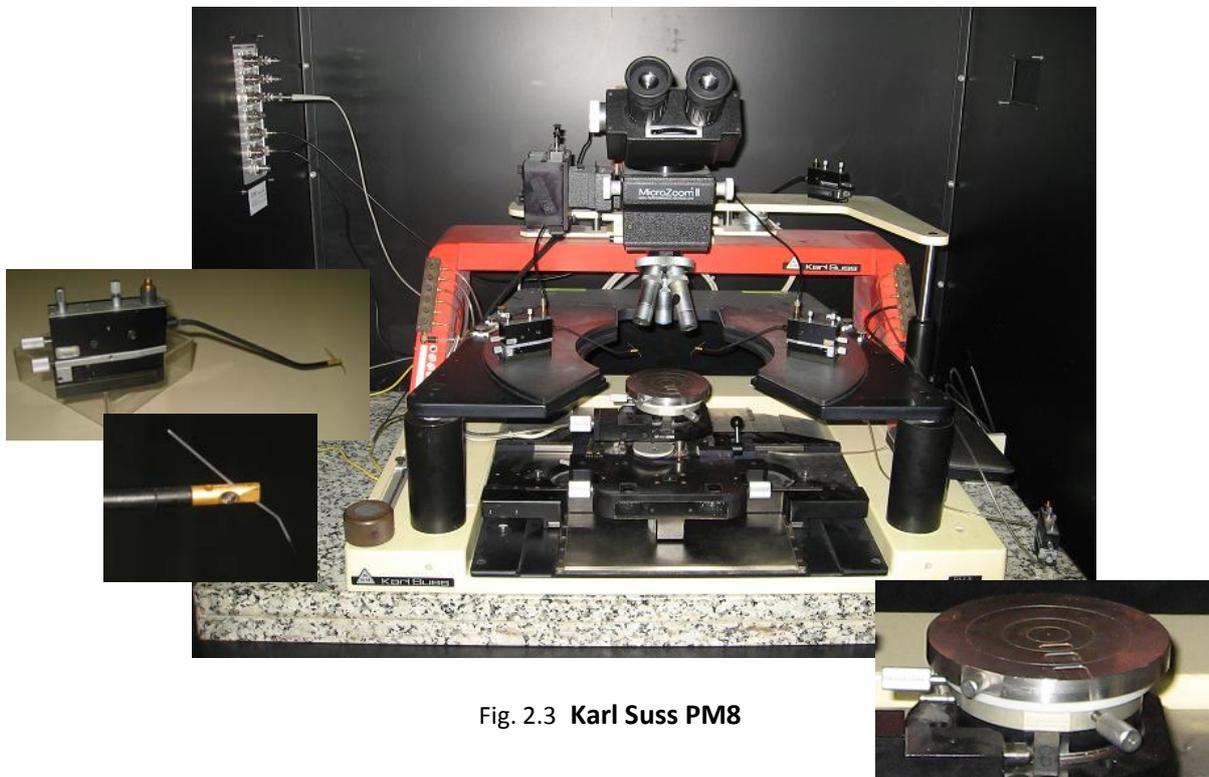


Fig. 2.3 Karl Suss PM8



El shuck es la base donde se apoya la oblea. Los hay fijos y movibles en tres ejes y rotativos para comodidad en el posicionamiento de la oblea.

Un sistema neumático hace vacío en varias zonas de shuck para sujetar la oblea y fijarla a él.

El shuck que utilizamos para las pruebas térmicas incorpora una resistencia que calienta la oblea, y un sistema de refrigeración líquida para pruebas por debajo de temperatura ambiente.

Para las mediciones de obleas donde la parte inferior es un contacto, tales como células solares, el shuck hace de terminal y posee doble pin para medición a 2 puntas.

Las puntas constan de un cuerpo, un brazo y una aguja. El cuerpo se fija a la base por vacío o por imantación. Mediante unos tornillos se puede ajustar la posición del brazo en los tres ejes para poder pinchar con precisión en el pad del dado. Un conector coaxial conecta el núcleo con el brazo y la malla al cuerpo de la punta. El brazo es de material conductivo, rígido y maleable; está anclado al sistema de movimiento del cuerpo y posee un muelle que hace de tope una vez hecho el contacto en el pad. La aguja es el elemento que entra en contacto con el pad del dado. Puede ser fija o con punta retráctil para no marcar el pad, su terminación puede ser cónica o roma. Típicamente es de oro, tungsteno o platino.

El microscopio está situado en un plano superior al conjunto de medición, nos permite ver con precisión en el momento de pinchar. Posee libertad de movimiento en dos ejes para desplazarse por toda la oblea. También sirve para inspeccionar posibles defectos en su fabricación e impurezas acumuladas del ambiente.

Todo el sistema de medición descansa sobre una plancha de mármol que le confiere estabilidad. Queda envuelto por una cavidad negra antirreflejo en cuyo frente tiene una cortina opaca para que la luz exterior no desvirtúe las mediciones en oscuridad. Un panel de conexiones situado en su lateral vincula las puntas con el adquisidor de datos. Por último, una pulsera de descarga a tierra libera al técnico de la corriente estática a fin de no dañar los dispositivos.



## 2.3 Analizador de parámetros de semiconductor

Este instrumento es el encargado de adquirir los puntos I-V para construir la gráfica característica del dispositivo. Es el equipo que permite interpretar las mediciones efectuadas.



Fig. 2.4 Precisión Semiconductor Parameter Analyzer - Agilent 4156C

Se compone de una unidad central que es el equipo encargado de procesar los datos, una unidad de expansión que consta de puertos SMU (Source/Monitor Unit) que se conectan con la máquina de puntas y una computadora externa con un software del fabricante que permite controlar el equipo.

Para comenzar a medir se abre el software y se selecciona el analizador entre una lista de equipos conectados al puerto GPIB de la computadora (General Purpose Interface Bus), un bus de datos que permite conectar varios instrumentos de laboratorio al PC, estableciendo la conexión con el equipo que se va a controlar.

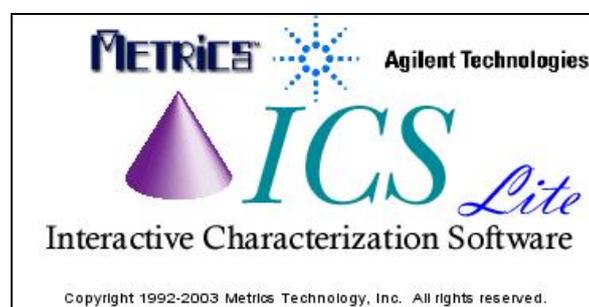
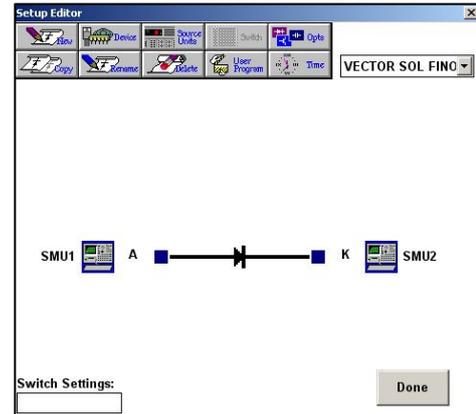


Fig. 2.5 Software de control



Se abre una sesión de trabajo, se escoge el semiconductor a medir a partir de una serie de modelos, se escoge el tipo de canal que se conecta a cada terminal del semiconductor en función de los disponibles que hay en el equipo seleccionado. En particular, se han usado dos canales SMU que son apropiados para medir corrientes del orden de los nA (corriente inversa de saturación del diodo). Cada uno de los canales estimula al semiconductor (Source) y sensa la magnitud a medir (Monitor).



Los canales SMUs son independientes; para cada uno se puede seleccionar el tipo de estímulo (corriente o tensión), los parámetros a medir, límites de protección y tipo de barrido. Para realizar la curva I-V se fija un potencial constante de cero Voltio en el cátodo del diodo (SMU2) y se genera un barrido lineal de tensión en el ánodo del diodo (SMU1) desde valores negativos para ver la corriente en inversa hasta valores positivos para ver el comportamiento en directa.

Se configura el intervalo de medición desde un valor de inicio (*Start*) hasta uno final (*Stop*), el número de muestras que se van a tomar (*Points*) o la resolución de la medición (*Step Size*) ya que una es función de la otra:

$$Points = \frac{Stop - Start}{Step Size} + 1 \quad [E 2.1]$$

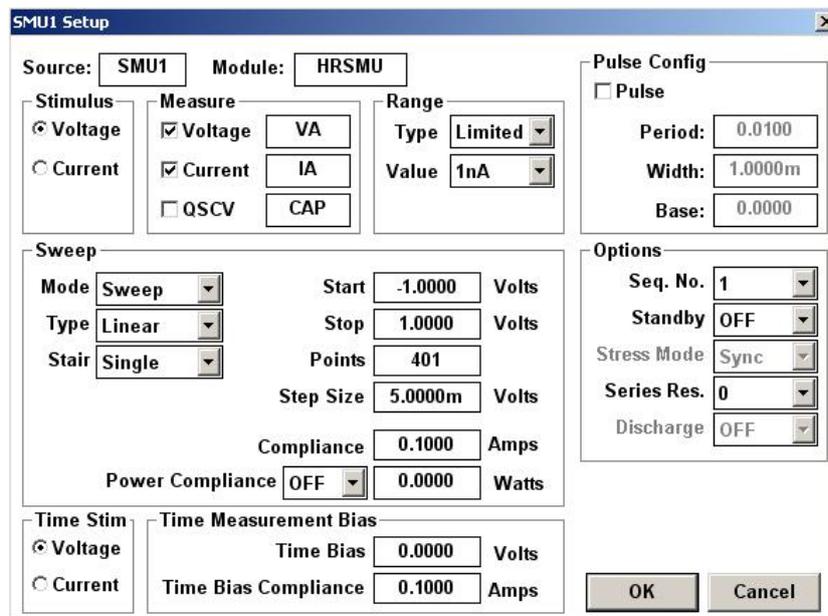


Fig. 2.6 Configuración de SMU1

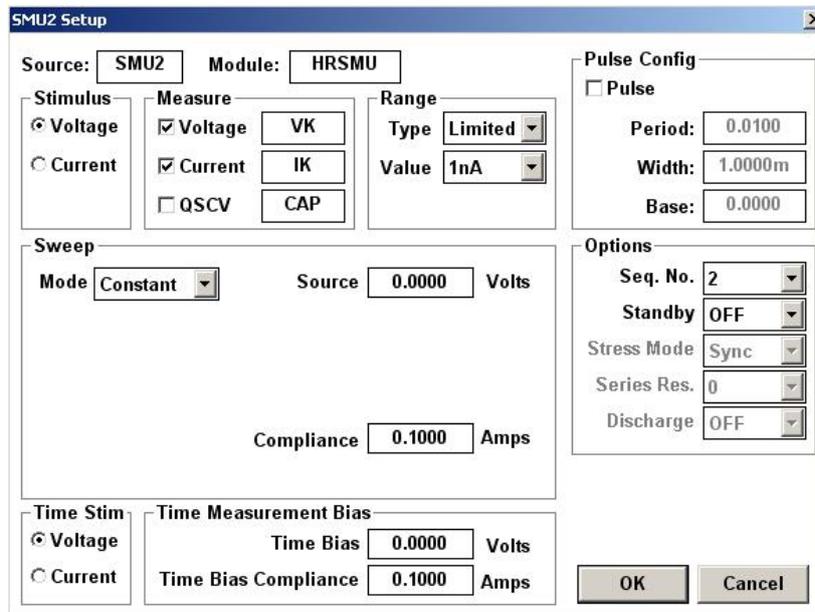


Fig. 2.7 Configuración de SMU2

Adicionalmente el programa permite generar funciones para las representaciones gráficas. Para poder graficar en escala logarítmica los valores negativos de la corriente de ánodo es necesario crear la función valor absoluto (ABS). De esta manera se aprecian los detalles de las pequeñas corrientes en inversa frente a grandes corrientes en directa. También se puede definir el producto de variables para poder representar otras funciones, en particular, IA por VA para obtener la potencia del diodo.

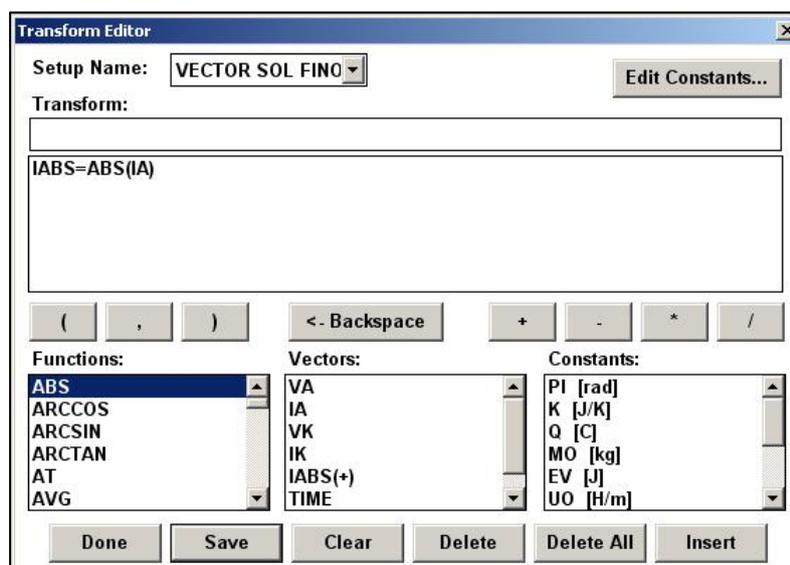


Fig. 2.8 Editor de ecuaciones



Previa a la adquisición de datos de la medición, debe escogerse el tiempo de integración adecuado para poder obtener un resultado lo más fidedigno posible y que conlleve el menor tiempo. El tiempo de integración está relacionado con el nivel de precisión de las mediciones que proporciona el analizador y depende de la relación señal/ruido. Fijado este parámetro, cuanto menor sea la relación señal/ruido de la medición mayor tiempo necesitará para alcanzarlo. El software permite escoger 3 niveles predefinidos (Short, Medium o High) o que lo defina el usuario (User).

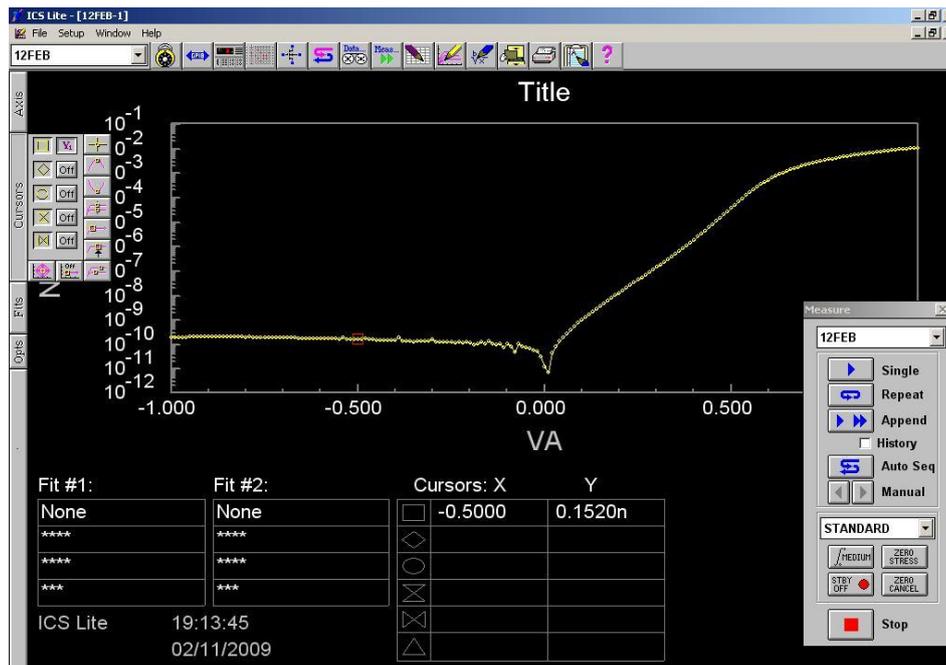


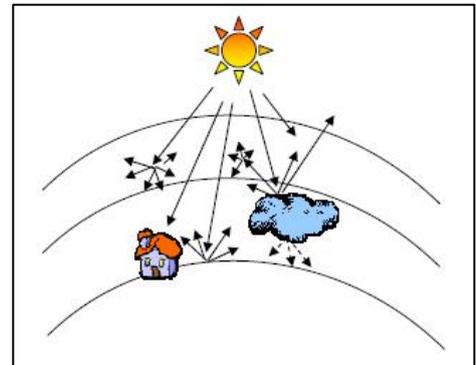
Fig. 2.9 Representación gráfica de la medición

Representada la medición, se pueden usar cursores para poder saber determinados valores de tensión o corriente sobre la gráfica, valores singulares como máximos o mínimos, diferencias entre valores para el cálculo de pendientes, etcétera.

Por último, se pueden exportar las mediciones para poder guardarlas a fichero y poder tratar sus valores posteriormente.

## 2.4 Luz solar

El sol es una fuente de luz espectral de energía renovable. Parte de la energía espectral de luz solar que llega y penetra en la atmósfera es atenuada debido a su naturaleza. La atmósfera terrestre está constituida de moléculas de ozono, oxígeno, vapor de agua y dióxido de carbono, entre otras, que provocan que algunas componentes espectrales de energía que llegan a la Tierra sean absorbidas. Otras moléculas gaseosas presentes, las partículas de polvo y contaminación y la presencia de nubes propician que las diferentes longitudes de onda de luz solar que chocan con éstos se refracten con diferentes ángulos. La dispersión lumínica y/o que estas ondas de luz aparentemente se curven. La difracción lumínica. La presencia de nubes y de la superficie terrestre también ocasionan la reflexión de la luz que incide en ellas. Todos estos fenómenos atmosféricos modifican, por tanto, el espectro de luz solar.



Existe un estándar de espectros solares llamados Air Mass (AM x) donde x hace referencia a la cantidad de masa de aire que tiene que atravesar la luz solar cuando entra en la atmósfera terrestre. En particular, AM0 significa que la luz medida está fuera de la atmósfera terrestre, AM1 indica que la luz incide perpendicularmente en la superficie, AM1.5 lo hace con un ángulo de incidencia de  $48,2^\circ$  respecto del zenit y AM2 con un ángulo de  $60^\circ$ . Si sólo tenemos en cuenta la componente directa de la luz solar incidente es AMxD (Direct) y si tenemos en cuenta todas las componentes que llegan al punto de medición es AMxG (Global)

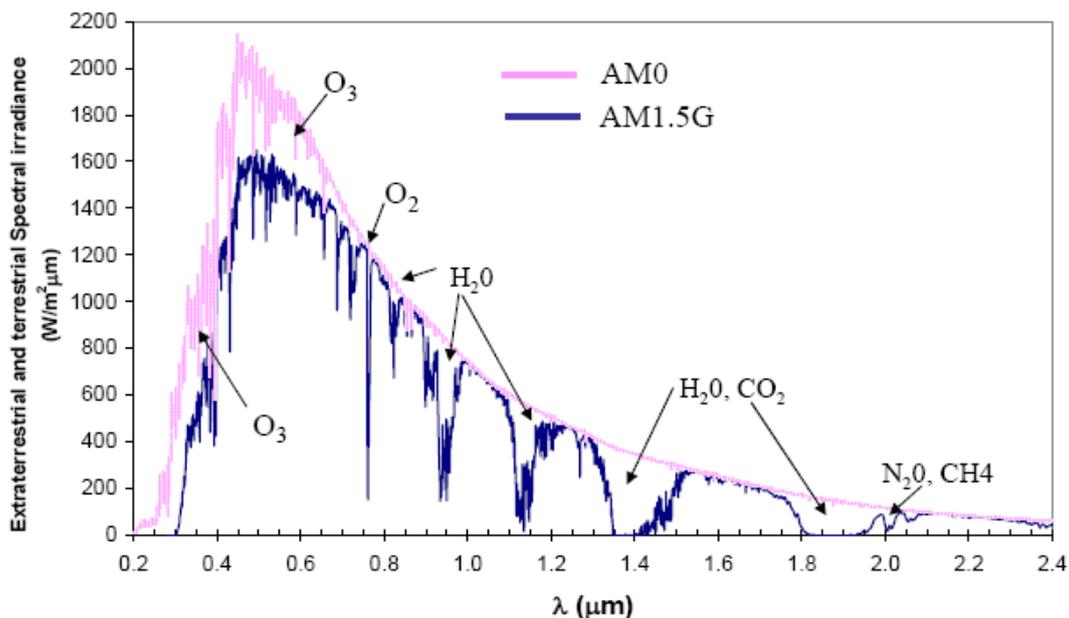


Fig. 2.10 Irradiancia espectral de AM0 y AM1.5G



El rango del espectro AM0 es infinito pero se puede aproximar entre los 200 y los 3000 nm mientras que el espectro AM1.5G va desde los 300 hasta los 2400 nm.

La potencia lumínica promedio anual extraterrestre medida en la órbita de la tierra es de  $1366 \text{ W/m}^2$  y la medida en la superficie terrestre es de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

## 2.5 Simulador solar

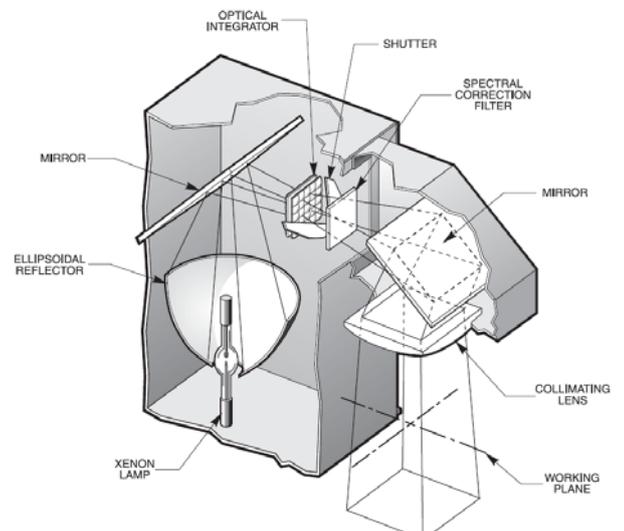
Es un equipo capaz de generar una luz en la que se puede variar la irradiancia, el espectro lumínico y se proyecta en forma de haz cilíndrico. Consta de dos partes: la fuente de alimentación y el cabezal óptico.



Fig. 2.11 Simulador solar Newport 69911

La fuente es la encargada de controlar el encendido y la energía de la lámpara. Se puede ajustar manualmente la potencia suministrada a la bombilla seleccionando el voltaje, la corriente o directamente la potencia dentro de unos límites establecidos previamente en función de la bombilla utilizada. También presenta la información de las horas de uso de la lámpara.

El cabezal óptico se compone de una bombilla de arco xenón situada en posición vertical dentro de un reflector elipsoidal que proyecta la luz hacia arriba, un espejo a  $45^\circ$  orienta el haz de luz en posición horizontal, el integrador óptico se encarga de dar uniformidad a la luz, un obturador intercalado permite el paso de la luz sin necesidad de apagar la lámpara, una ranura donde se coloca un diafragma que permite variar la potencia lumínica sin necesidad de variar la potencia eléctrica, otra ranura donde se inserta un determinado filtro que corrige el espectro de la luz de xenón y proporciona el espectro de luz solar deseado, otro espejo a  $45^\circ$  nos proyectará el haz hacia el plano de trabajo pasando finalmente por un filtro que colima la luz para obtener un haz de rayos paralelos.



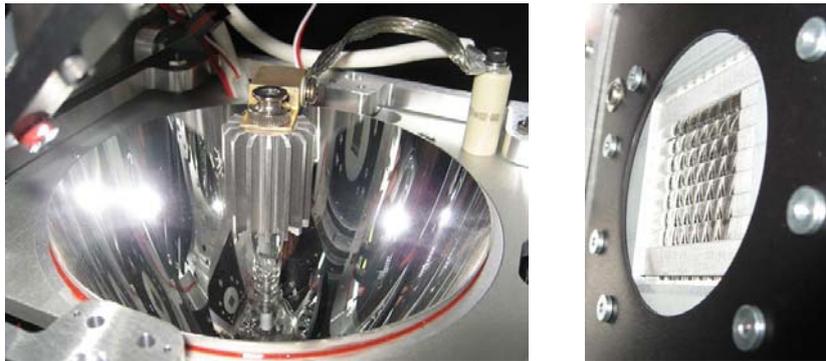


Fig. 2.12 Detalle de bombilla, reflector e integrador

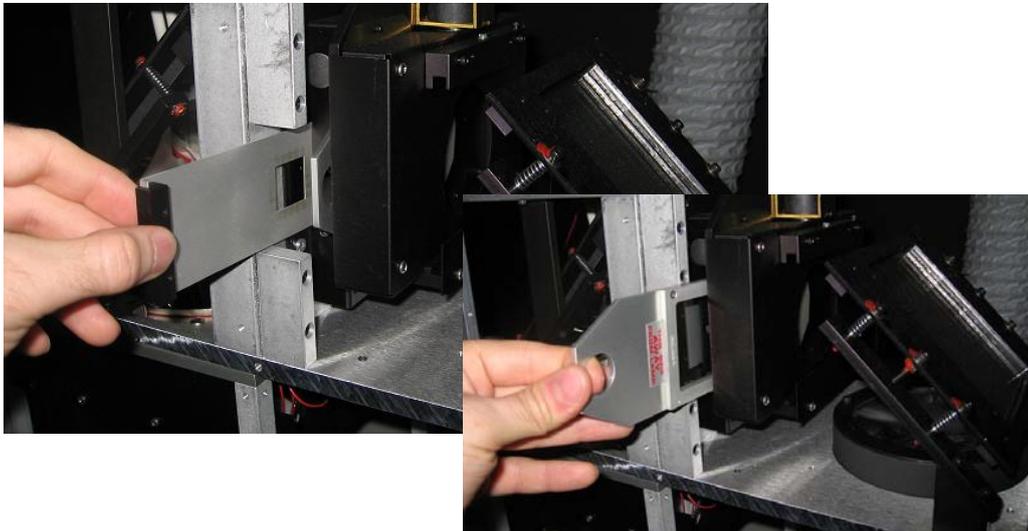


Fig. 2.13 Inserción de diafragma y filtro

Como medidas de seguridad al trabajar con el simulador solar es necesario el uso de gafas de protección contra las radiaciones ultravioletas.



La lámpara de xenón genera ozono en su proximidad el cual es perjudicial para la salud, por lo que se coloca un extractor para ventilar el lugar de trabajo.





## 2.6 Piranómetro

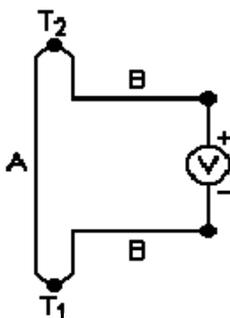
Es un instrumento preciso de medición de radiación lumínica que se compone típicamente de un cuerpo cilíndrico o cónico que termina en su parte superior en un cúpula transparente. Esta cúpula de material cristalino filtra una parte del espectro lumínico y tiene como funciones recoger cualquier radiación lumínica comprendida entre los 0 y 180 grados del plano del sensor. Este sensor se encuentra en la parte inferior de la cúpula y consta de una superficie negra encargada de absorber toda la radiación lumínica que le llega y una termopila.



Fig. 2.14 Piranómetro

La termopila convierte en tensión eléctrica linealmente la potencia de luz espectral detectada perpendicularmente. Su parámetro característico es la sensibilidad piranométrica expresada usualmente en  $\mu\text{V}/\text{W}/\text{cm}^2$ . El espectro de luz que le llega depende del material de la cúpula, que filtra determinadas longitudes de onda limitando la respuesta del sensor al rango de trabajo deseado. La respuesta al flujo de radiación lumínica varía con el coseno del ángulo de incidencia, de tal forma que para un mismo nivel de radiación cuando su incidencia sea perpendicular al plano del piranómetro la tensión de salida es máxima y cuando la incidencia sea paralela al plano la tensión de salida es nula.

El principio de funcionamiento está basado en el efecto de Seebeck.



Un termopar genera una tensión proporcional a la temperatura ambiente mientras que la otra, que está expuesta a la luz incidente, genera una tensión proporcional a la temperatura del cuerpo negro más la temperatura ambiente. Conectadas de forma inversa la tensión de salida será proporcional sólo a la temperatura generada por la luz incidente en el cuerpo negro.





## 3 Clasificación, mediciones

En todo proceso de fabricación siempre hay deficiencias que nos dan como resultado diferentes niveles de calidad del producto. Por ello, se debe contemplar siempre un control de calidad en el que se clasifican en diferentes grupos de acuerdo a unas especificaciones previas. Para poder determinar la calidad de los dispositivos todos los datos fueron sometidos a un proceso de mediciones en serie en el laboratorio de Caracterización L-105 en el que se tomaron capturas de las gráficas obtenidas y sus datos fueron exportados. Primeramente se realizan mediciones en oscuridad en un entorno de trabajo cuyo analizador HP 4156 ofrecía una resolución de  $10^{-10}$ A y posteriormente para clasificar los dispositivos se cambió el entorno de trabajo usando el analizador HP4028. A continuación, fueron analizados sus resultados y de acuerdo a unos criterios predefinidos los datos fueron calificados en 5 tipos de calidades: *vuelo*, *calificación*, *ingeniería.1*, *ingeniería 2* y *pruebas físicas*.

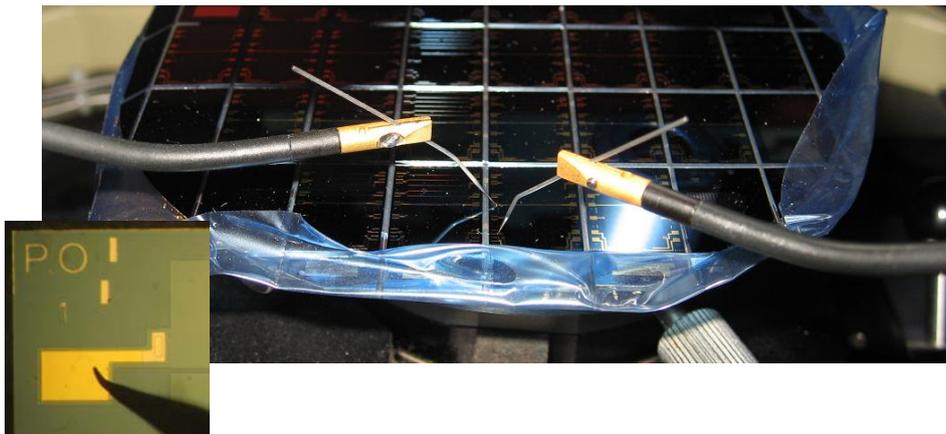
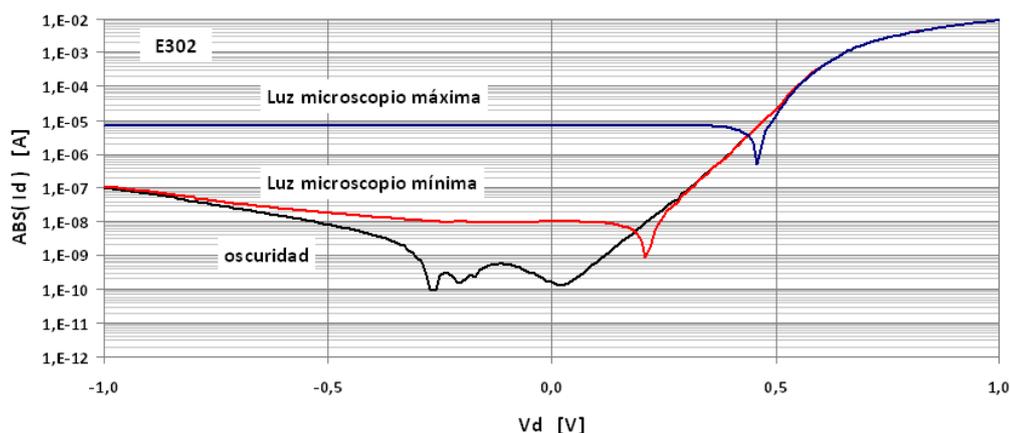


Fig. 3.1 Pinchado del dado en oblea y detalle de la punta y el pad

### 3.1 Condiciones de medición

En mediciones efectuadas con luz los valores de corriente en inversa del diodo son linealmente proporcionales a la irradiancia lumínica y suelen ser entre 5 y 7 décadas mayores que en condiciones de oscuridad. Por el contrario, en ausencia de luz los valores de corriente dependen de la bonanza del proceso de fabricación por lo que las mediciones en oscuridad son un buen indicador del grado de calidad del diodo. Como quiera que el fotodiodo no genera corriente en ausencia de luz, la característica I-V en oscuridad debe tener una corriente nula para tensión cero y la corriente en inversa varía entre  $10^{-8}$  y  $10^{-10}$  A.

Para un mismo diodo puede observarse como las mediciones bajo distintas potencias de luz enmascaran los defectos de fabricación que en oscuridad sí que son apreciados.



G 3.1 Característica I-V en oscuridad y con luz

En un primer momento se pensó polarizar los diodos con una recta de carga de  $-0,3$  V para cualquier valor de corriente, por lo que las primeras mediciones se realizaron haciendo barridos desde  $-1$  a  $1$  V. Posteriormente se planteó una recta de carga resistiva en un rango dinámico igual al convertor A/D que se utiliza y se hizo un barrido desde  $-5$  a  $1$  V para ver la corriente en esos límites. Finalmente, al observar comportamientos extraños en inversa, se amplía la investigación en oscuridad desde  $-30$  a  $1$  V donde se observa la tensión de ruptura y posibles dobles rupturas del diodo.

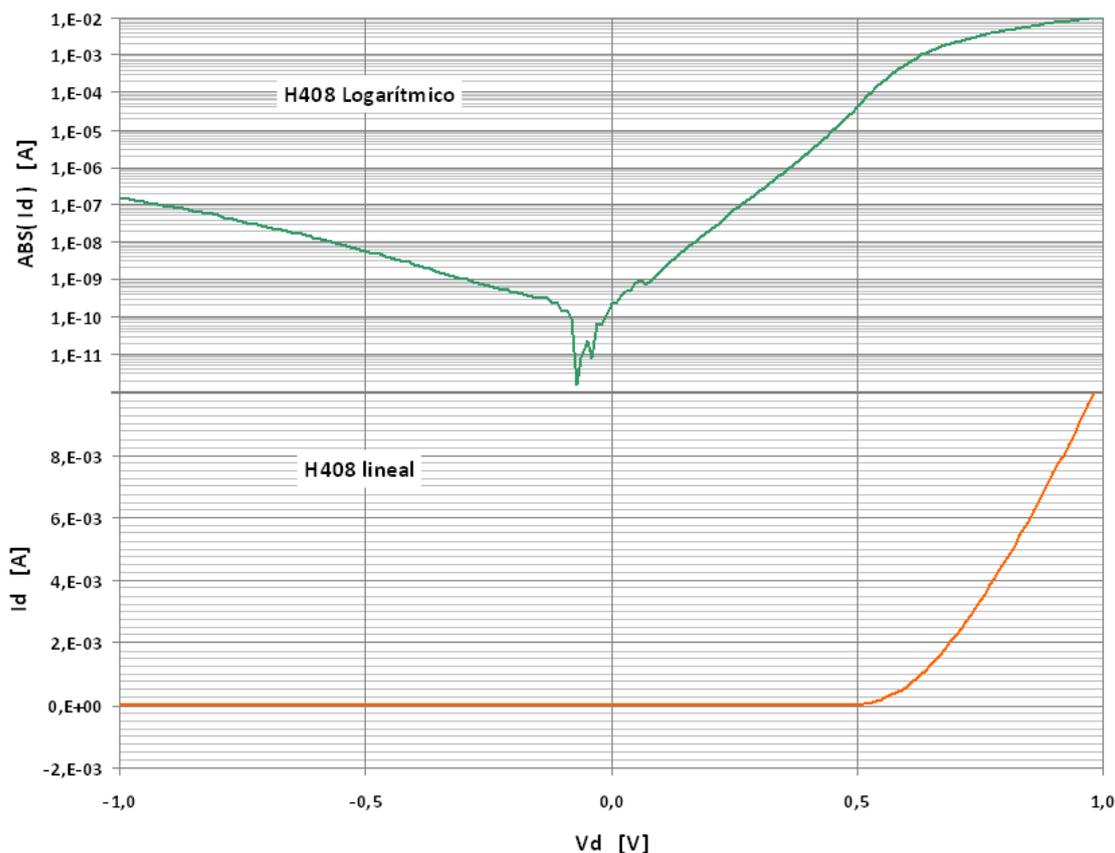
### 3.2 Representación

Un buen comportamiento del diodo debe tener una característica en oscuridad en la que la pendiente en inversa es nula y una corriente cercana al  $0$  V por debajo de los  $10^{-8}$  A, mientras que en la zona directa la corriente debe crecer lo más recta y rápidamente posible en escala semilogarítmica.

#### Gráfica logarítmica

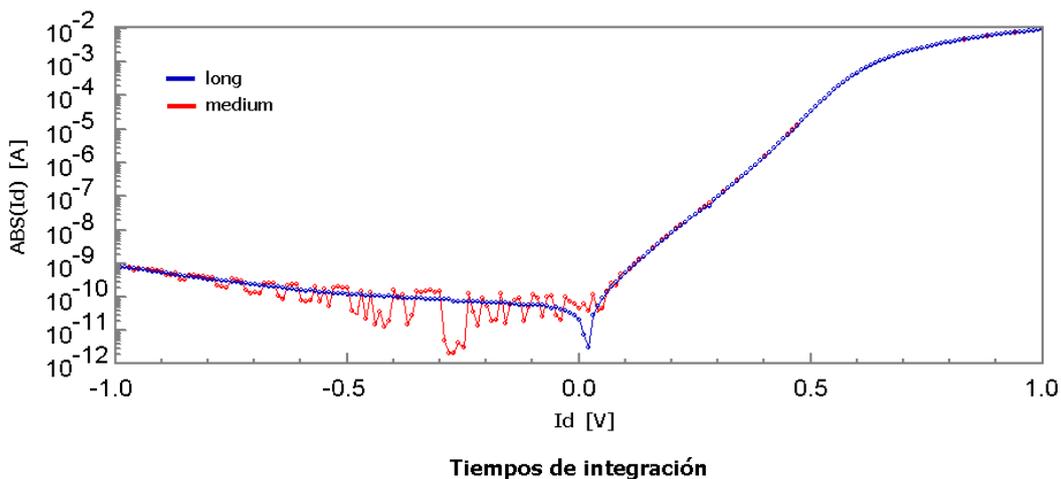
Al realizar un barrido en tensión desde valores negativos a valores positivos, las corrientes pasan desde los  $10^{-10}$  A en la zona en inversa hasta  $10^{-2}$  A en directa, lo cual representa una diferencia de 8 décadas. Con una representación semilogarítmica se pueden visualizar las formas de las bajas corrientes y las formas de las altas corrientes en directa abarcando todo el rango de valores. De esta manera se puede calcular, en particular, la pendiente de la corriente en inversa que indica la resistencia en inversa del diodo. Para poder representar el eje de corrientes en logarítmico se han pasado a valor absoluto sus puntos.

En valores cercanos al cero, donde la corriente cambia de negativo a positivo, el ruido de la señal medida genera muestras positivas y negativas antes y después del cambio de polaridad de la corriente, al hacer el valor absoluto sólo se invierte el signo de las muestras negativas, esta rectificación genera falsos niveles muy bajos de corrientes distorsionando la representación semilogarítmica en la zona de  $0$  V. Este efecto explica por qué el pico corriente cero aparece desplazado a la izquierda respecto al esperado en ausencia de luz.



G 3.2 Comparativa de representación logarítmica y lineal

Tiempo de integración



G 3.3 Tiempos de integraciones

De acuerdo a la relación señal/ruido que tenga la característica I-V medida interesa representarla con un tiempo de integración adecuado. Cuando la característica I-V tiene niveles de ruido comparables a la corriente en inversa una representación con un tiempo de integración *medium* no es suficiente para trazar la característica correctamente. Sin embargo, cambiando el tiempo de integración a *long* el analizador mide lo suficientemente lento para poder filtrar las



fluctuaciones de las bajas corrientes. El tiempo de integración *short* no fue considerado ya que el sistema mide tan rápido que sigue cualquier variación de corriente baja o ruido introducido por el sistema desvirtuando así la característica real.

### Resolución y rango

Para poder obtener los parámetros característicos de cada fotodiodo con cierta precisión se ha realizado una medición entre -1 a 1 V con una resolución alta de 401 puntos. Para poder observar el comportamiento de la característica en inversa se ha ampliado la medición de -30 a 1 V y se ha considerado una resolución de 201 puntos.

### 3.3 Motivos de test

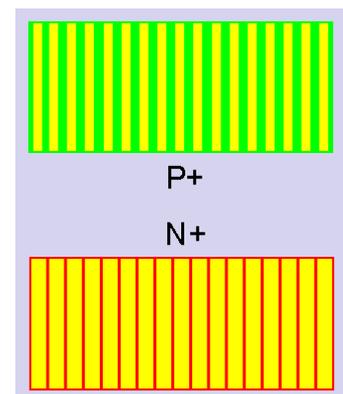
Son diseños situados en el contorno de la oblea que permiten testear los distintos procesos de fabricación de los fotodiodos. Hay motivos de test para la caracterización de las zonas activas P<sup>+</sup> y N<sup>+</sup> y motivos para los conductores que permiten medir sus resistencias después de la fabricación.

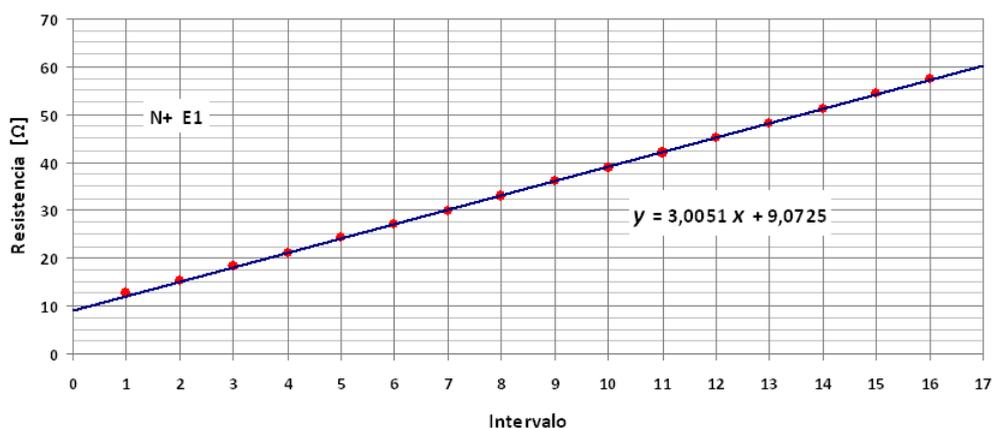
Al medir los motivos de test se caracterizan las no idealidades: el cálculo de las resistencias de las zonas activas nos da la resistencia en paralelo equivalente del diodo y las resistencias de los contactos nos da la resistencia en serie.

Para poder determinar las resistencias de cuadro de las distintas partes se hicieron mediciones de resistencia y mediciones acumulativas. La resistencia de cuadro es la unidad normalizada de resistencia a partir de la cual se compone la resistencia de las distintas regiones de interés, es sólo función de la resistividad y profundidad de la muestra.

#### Resistencia zona activa

Para el motivo de la zona P<sup>+</sup> las tiras verdes representan la zona difundida y para el de la zona N<sup>+</sup> las líneas rojas son la zona activa N<sup>+</sup>. Las áreas amarillas de ambos son tiras de platino con una cobertura de oro donde se pincha para realizar las mediciones. En cada medición una de las puntas era pinchada en el primer contacto y la otra punta era pinchada en un contacto contiguo. De manera sucesiva esta punta era pinchada en contactos cada vez más distantes del primero y se iba midiendo la resistencia de las zonas activas acumulando valor de resistencia.





### G 3.4 Medición acumulativa para el cálculo de la resistencia de N<sup>+</sup>

La pendiente es la resistencia del intervalo asociada a la zona N+, el valor de la ordenada en el origen indica la resistencia serie de la medición.

En la tabla, T y L son el largo y el ancho respectivamente de cada escalón de medición de la zona activa N+ y la resistencia de cuadro se calcula multiplicando la resistencia del escalón por T y dividiendo entre L.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{T \cdot W} = R_{sh\Box} \frac{L}{T} \quad [E 3.1]$$

Dado	T (mm)	L (mm)	Pendiente [Ω]	Rsh [Ω/sq]
C1	2,925	0,375	3,096	24,152
E1	2,925	0,375	3,005	23,440
A2	2,925	0,375	3,302	25,754
A3	2,925	0,375	2,930	22,852
B6	2,925	0,375	3,295	25,699
G6	2,925	0,375	3,462	27,004
H2	2,925	0,375	3,209	25,028
H3	2,925	0,375	3,081	24,035

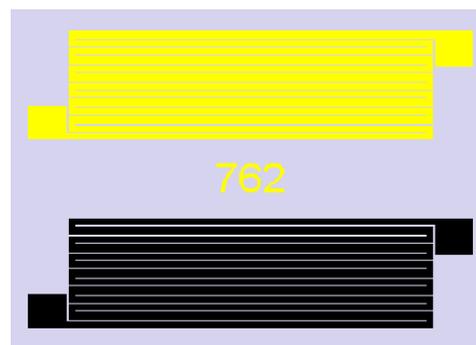
### T 3.1 Resistencia de cuadro N<sup>+</sup>

#### Resistencia de conductor

El cálculo de la resistencia de cuadro de los materiales conductores es mas sencillo, basta con medir la resistencia del motivo de test y dividirlo entre la cantidad de cuadros que representa el área del motivo. El color amarillo representa a los contactos de oro y el negro al platino, el número indica la cantidad de cuadros.



Material	Dado	R [ $\Omega$ ]	Nº de ■	R ■
Au	A3	66,2	762	0,087
Pt	A3	971,4	762	1,275
Pt	C7	1060,7	762	1,392
Au	D7	75,8	762	0,099
Au	E7	73,0	762	0,096
Au	F7	71,4	762	0,094
Au	H3	66,2	762	0,087
Pt	H3	1197,9	762	1,572



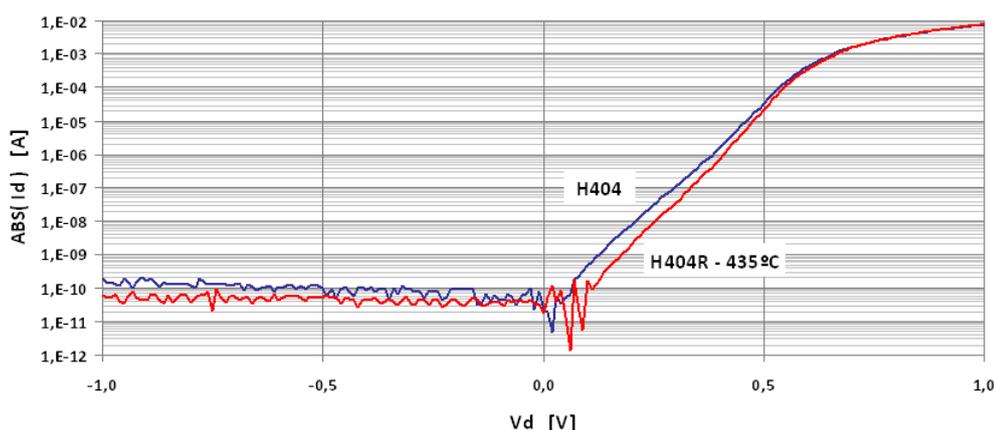
T 3.2 Cálculo de la resistencia de conductores

### 3.4 Recocido

Para mejorar las prestaciones de los dispositivos los dados son nuevamente sometidos a una determinada temperatura durante un determinado tiempo. Este último proceso en la fase de fabricación de la oblea provoca que las diferentes metalizaciones que conforman los contactos queden mejor soldadas entre sí. En consecuencia, se repercute en una mejora de la característica I-V de los fotodiodos.

En la práctica se realizaron dos recocidos durante 15 minutos: primero se recocieron a 450°C dos dados y luego a 435°C otros 11 dados obteniéndose en la mayoría de los casos una mejora de la característica de los diodos, si bien la de algún fotodiodo empeoró.

#### Diodo bueno

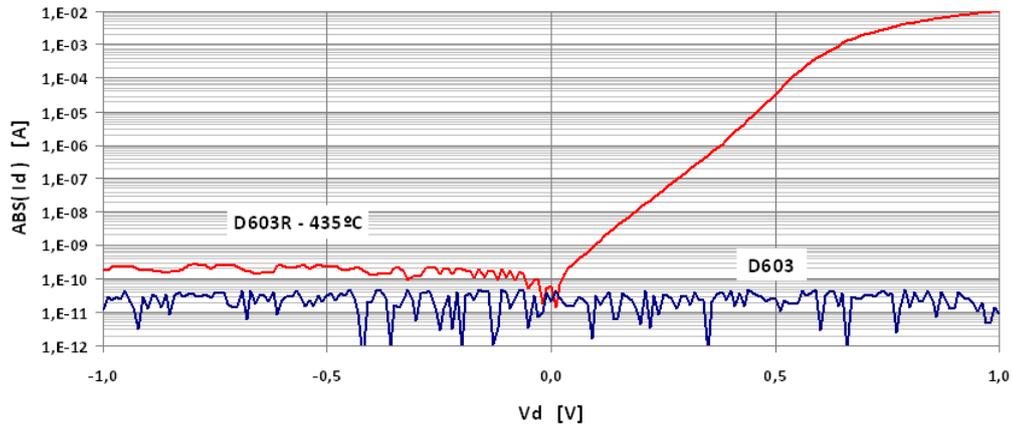


G 3.5 Mejora de H404

La curva azul muestra una característica del dado antes del recocido bastante buena. Sin embargo, después de un recocido de 435 °C la curva roja muestra que la corriente en inversa baja apreciablemente y la pendiente de la corriente en directa aumenta mejorando así el *Fill Factor* cuando el dado es iluminado. Por consiguiente, el dado H404 mejora con el recocido.



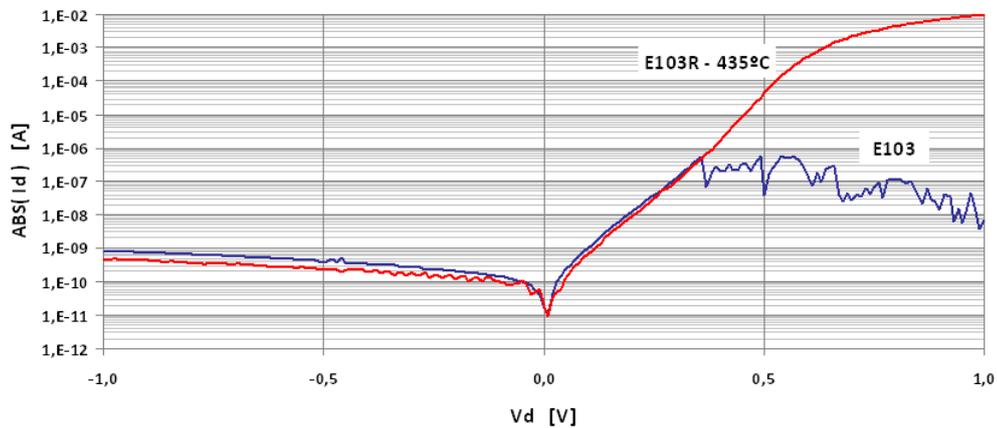
### Diodo en circuito abierto



G 3.6 Creación de los contactos en D603

Debido a la ausencia del contacto entre la metalización y la zona  $N^+$  el diodo queda abierto tal y como se aprecia en la gráfica azul. Después de recocer el diodo D603 a  $435^\circ\text{C}$  se consigue crear el contacto y se obtiene una característica bastante buena.

### Diodo con defecto en directa

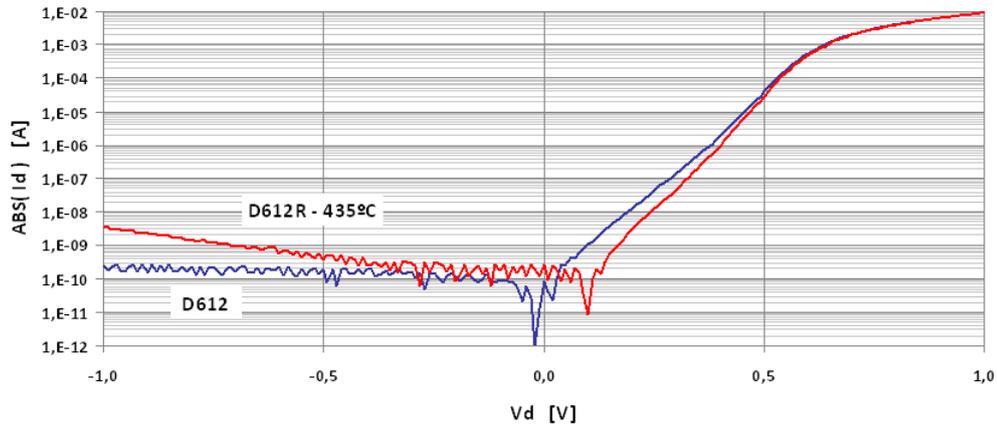


G 3.7 Mejora de los contactos en E103

Como se observa en la gráfica azul, a partir de una determinada corriente en directa los contactos entre la zona  $N^+$  del diodo E103 y la metalización dejan de funcionar. Tras un recocido a  $435^\circ\text{C}$  se restituyen los contactos y se obtiene una buena característica



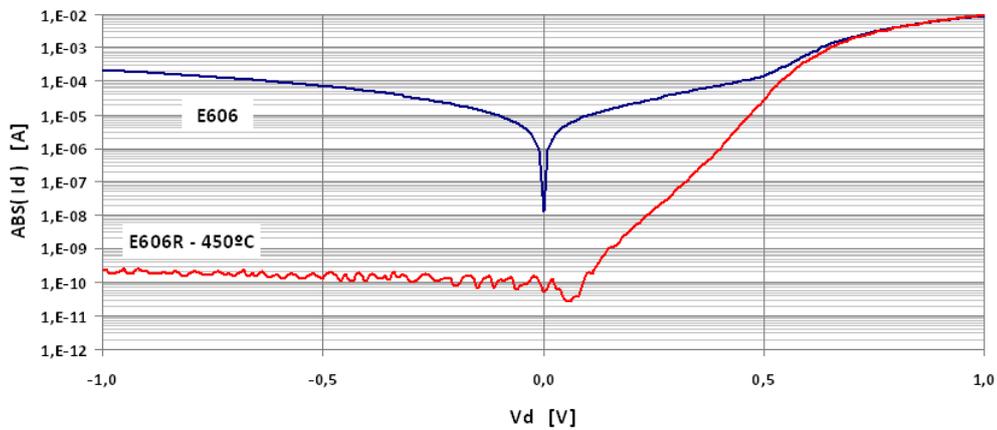
### Diodo empeorado



G 3.8 Empeoramiento de D612

En el menor de los casos el proceso de recocido provoca un empeoramiento del diodo. Después de recocerlo a 435 °C, en el fotodiodo D612 aparece una pendiente en la zona en inversa asociada a una ruptura en inversa prematura provocada por el recocido.

### Diodo con resistencia en inversa y "S" en directa



G 3.9 Mejora del E606

El fotodiodo E606 antes del recocido tiene un comportamiento nefasto por tener una corriente en inversa del orden de  $10^{-3}$ A y un comportamiento en directa en forma de "S". Tras un recocido a 450 °C se logra disminuir enormemente su corriente en inversa y desaparece la "S".



### 3.5 Clasificación de datos

La clasificación de los datos recocidos fue realizada en paralelo con la caracterización en otro entorno de trabajo provisto del analizador HP 4028, que tiene una resolución de  $10^{-7}$  A. La clasificación de los datos no recocidos fue realizada con el analizador HP 4156 que tiene una resolución de  $10^{-10}$  A.

Se han considerado 2 clasificaciones: una para los datos que no han sido recocidos y otra para los que sí han sido recocidos. Para clasificar los diodos no recocidos se ha tenido en cuenta el orden de magnitud de la corriente en inversa y su pendiente obteniendo el siguiente criterio de puntuación:

Nota	$I_{inversa}$ [A]	Pendiente inversa
10-9	$< 10^{-9}$	nula
8-7	$10^{-9} - 10^{-8}$	pequeña
6-5	$10^{-8} - 10^{-7}$	pronunciada
4-3	$10^{-7} - 10^{-5}$	grande
2-1	$> 10^{-5}$	grande

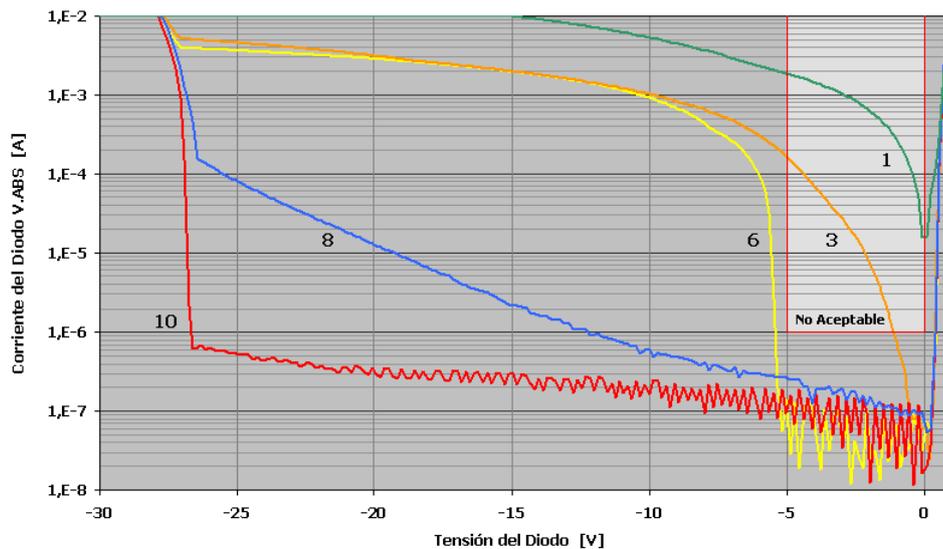
T 3.3 Clasificación de datos no recocidos

Para clasificar los diodos recocidos se ha tenido en cuenta la tensión para la cual se produce la ruptura de la unión, la corriente en inversa en ese punto, la doble ruptura de la unión y la pendiente de la corriente en la zona en inversa. Para ello, se han hecho barridos desde -30 a 1 V. El criterio de evaluación de los fotodiodos es el siguiente:

Nota	$V_{rupt 1\theta}$ [V]	$I_{inversa}$ [A] en la Ruptura	Doble Ruptura
10	$\approx -27$	$< 10^{-6}$	No
9	$\approx -27$	$10^{-6} - 10^{-5}$	No
8	$\approx -27$	$10^{-5} - 10^{-4}$	No
7	$< -10$	$< 10^{-6}$	Sí
6	-5	$< 10^{-6}$	Sí
5	$> -5$	$> 10^{-6}$	Sí
4	$> -5$	$> 10^{-6}$	Sí
3	$> -2$	$< 10^{-6}$	Sí
2	$\approx 0$	$< 10^{-6}$	Sí
1	0	$> 10^{-6}$	Sí

T 3.4 Clasificación de datos recocidos

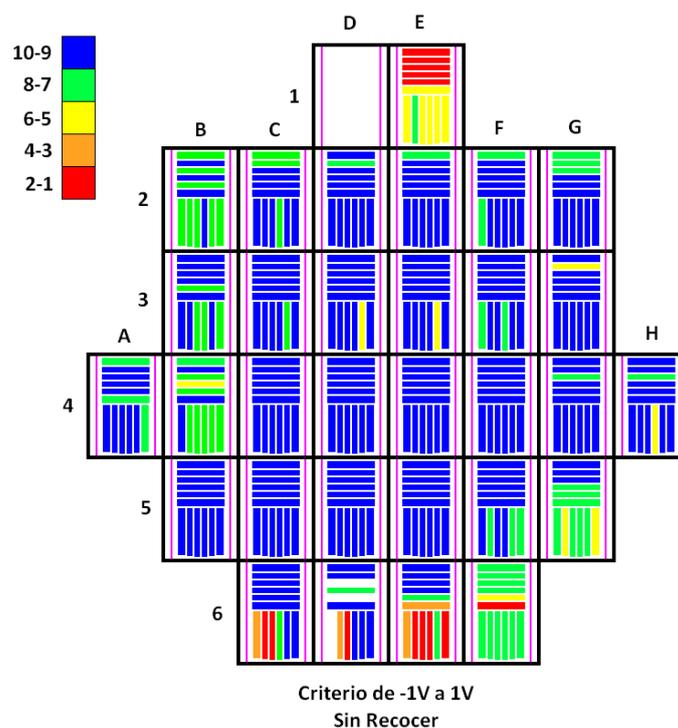
Con el propósito de simplificar la presentación, se exponen 5 gráficas representativas que muestran los criterios de la tabla anterior.



G 3.10 Patrones de clasificación

Una vez calificados todos los diodos y sin efectuar recocido se representan en el mapa de la oblea de acuerdo a un código de colores dando un aspecto visual de su posición y calidad. Puede apreciarse como mayoritariamente los mejores fotodiodos están en las zonas centrales de la oblea y los más deficientes se encuentran en la parte superior e inferior. Esto es debido a que en los procesos de alineamiento de máscaras en las litografías de la fabricación se prioriza el centro, los procesos de difusión son mas uniformes también en el centro, etcétera. Además, la oblea siempre se manipula por los bordes.

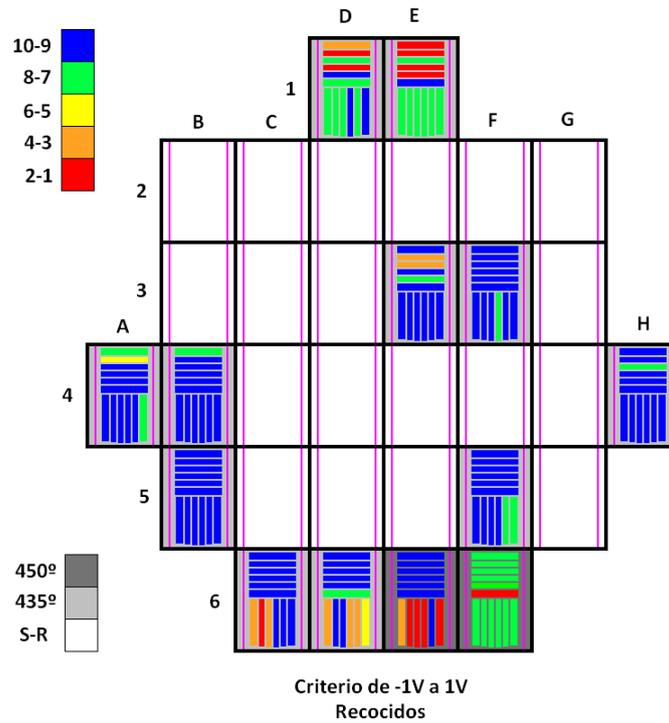
En una primera calificación las mediciones se han realizado desde -1 a 1 V. El dado D1 no está presente en este mapeo puesto que se recoció antes de las mediciones.



G 3.11 Mapa de notas sin recocido y medidos de -1 a 1 V.

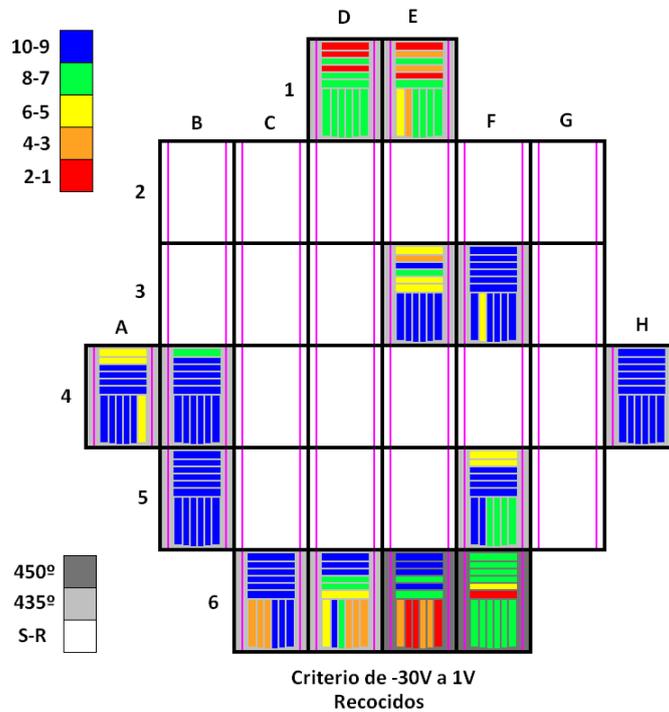


Después de recocer los 13 dados que presentan peores características I-V se vuelven a medir entre -1 y 1 V observando una mejora generalizada salvo alguna excepción.



G 3.12 Mapa de notas con recocido y medidos de -1 a 1 V

Posteriormente se vuelven a medir los dados recocidos de -30 a 1 V y se clasifican según los Patrones de Clasificación, se observa como la calificación de todos los dados aumenta ligeramente.



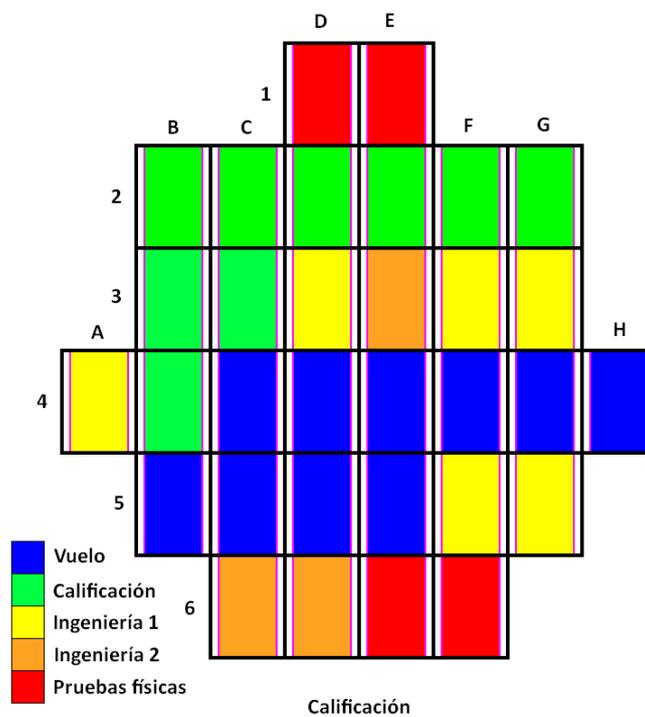
G 3.13 Mapa de notas con recocido y medidos de -30 a 1 V



Por último, una vez que se han calificado todos los fotodiodos se procede a calificar los dados en función de éstos. La calificación de cada dado está determinada por la peor nota de los diodos que lo componen. El criterio para la calificación de los dados es el siguiente:

Clasificación	Nota diodos
Vuelo	Todos 10-9
Calificación	El peor 8-7
Ingeniería 1	El peor 6-5
Ingeniería 2	El peor 4-3
Pruebas físicas	El peor 2-1

T 3.5 Clasificación de dados



G 3.14 Calificación final de los dados



## 4 Caracterización, mediciones

Para realizar la caracterización de los fotodiodos se ha utilizado otro entorno de trabajo distinto al de la clasificación de los fotodiodos ya que en él se encuentra el simulador solar, el calefactor y el refrigerador con el que se realizan las pruebas térmicas.



Fig. 4.1 Banco de Caracterización

### 4.1 Configuración de la medición

Con el propósito de conocer la respuesta de los fotodiodos ante distintos espectros de luz, se han configurado determinados estándares de irradiancia. En concreto, se han hecho 3 tipos de mediciones lumínicas: AM0 a  $1366 \text{ W/m}^2$ , AM0 a  $1000 \text{ W/m}^2$  y AM1,5G a  $1000 \text{ W/m}^2$ .

#### 4.1.1 Calibración del simulador solar

Con la ayuda del piranómetro situado a la misma altura que tiene la superficie del shuck e insertados el diafragma y filtro adecuados, se ajusta la potencia eléctrica del simulador para obtener la tensión de salida correspondiente del piranómetro previamente calculada. Para ello, se ha multiplicado la sensibilidad del piranómetro por la irradiancia que se quiere simular obteniéndose la tensión del piranómetro. Se han obtenido los siguientes resultados:



$S_{in}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$V_{pir}$ [V]	$P_{simulador}$ [W] Diafragma pequeño	$P_{simulador}$ [W] Diafragma grande
1366	21,53	345	205
1000	15,76	262	162

#### T 4.1 Calibración del simulador

Se han establecido unas referencias simulador-shuck para asegurar siempre la misma posición relativa entre ellos con el fin de que el dado siempre esté en el centro del haz de luz.

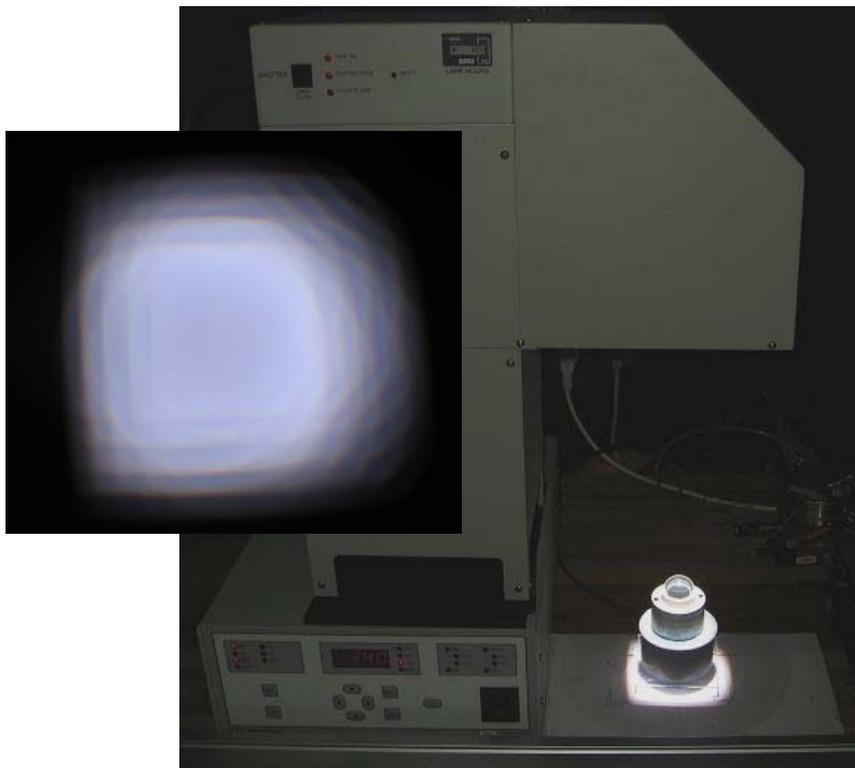


Fig. 4.2 **Simulador solar y piranómetro**

Para comprobar el grado de uniformidad de la luz del simulador se hace un mapeado con la ayuda de un fotodiodo y se mide la corriente generada en diferentes puntos obteniendo una serie de coronas en forma de “D” concéntricas que indican los cambios de intensidad lumínica. Para tener un resultado visual y real de este estudio, se coloca un papel blanco donde se proyecta la luz. En particular, puede apreciarse como hay una zona central uniforme que tiene una menor intensidad que la corona que la envuelve y como a partir de esa corona hay un degradé. El encargado de proporcionar la uniformidad lumínica es el integrador óptico del simulador solar. También se verifica el grado de colimación de la luz situando el fotodiodo a distintas alturas y se observa como la corriente generada es aproximadamente constante en un rango de 20 cm por lo que se puede concluir que el simulador brinda una buena colimación.



#### 4.1.2 Setup de la medición

Una buena disposición de los distintos elementos para la medición en el shuck determina un buen setup para la medición. El dado debe ser posicionado en el orificio céntrico del shuck para que la bomba de vacío lo fije a él, el fotodiodo sensor que va indicando en cada momento las fluctuaciones que sufre el simulador, y el sensor de temperatura deben estar situados cerca del dado para dar una lectura lo más real posible. Las puntas deben estar situadas de tal manera que no provoquen sombras y no desvirtúen la medición. Es importante destacar que la intensidad de la luz varía con las horas de encendido de la lámpara, por lo que una vez ajustada la potencia con el piranómetro, se mide la corriente  $I_{sc}$  del fotodiodo sensor y luego con el paso del tiempo se va reajustando la potencia eléctrica manteniendo constante la corriente para mayor uniformidad en las sucesivas mediciones de los fotodiodos.

Con la ayuda del microscopio se consigue pinchar con precisión en los pads del dado. Un sistema térmico compuesto de un calefactor y un refrigerador permiten hacer las simulaciones en temperatura; en el interior del shuck se encuentra una cavidad donde se aloja la resistencia que calienta el corazón del shuck y un circuito en forma de zig-zag por donde circula el agua del refrigerador que trasfiere el frío al dado.

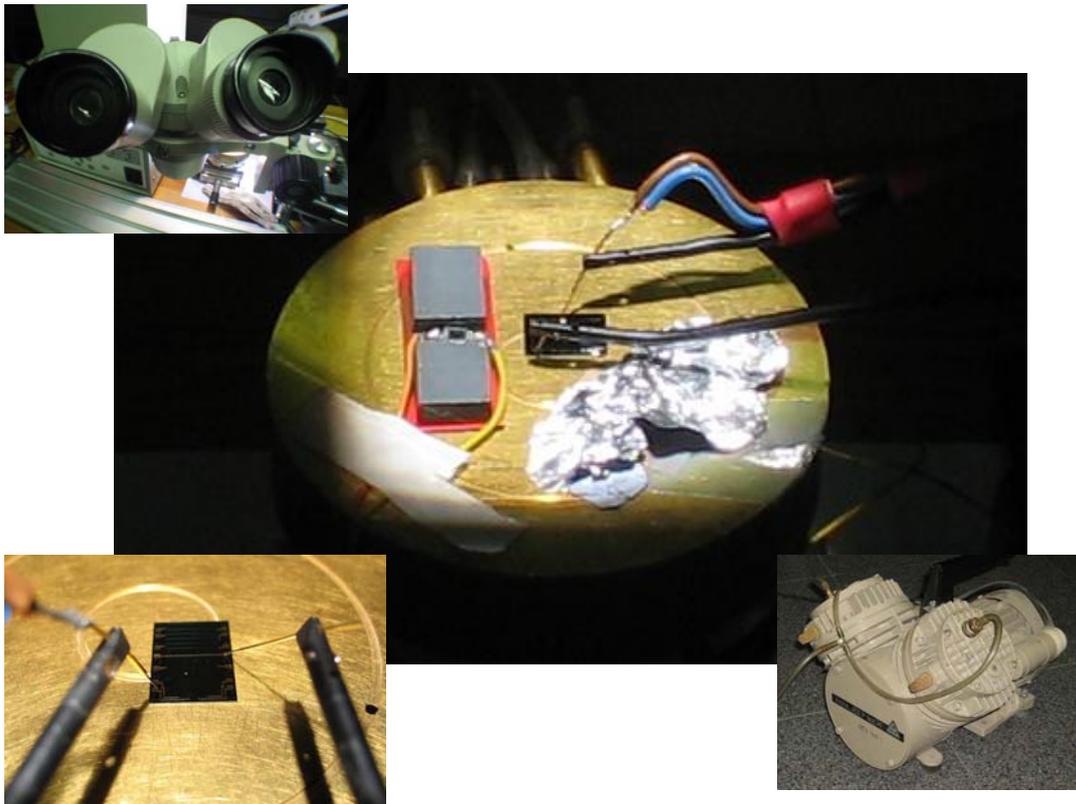


Fig. 4.3 **Setup con Luz. Detalle de microscopio, puntas y bomba de vacío**



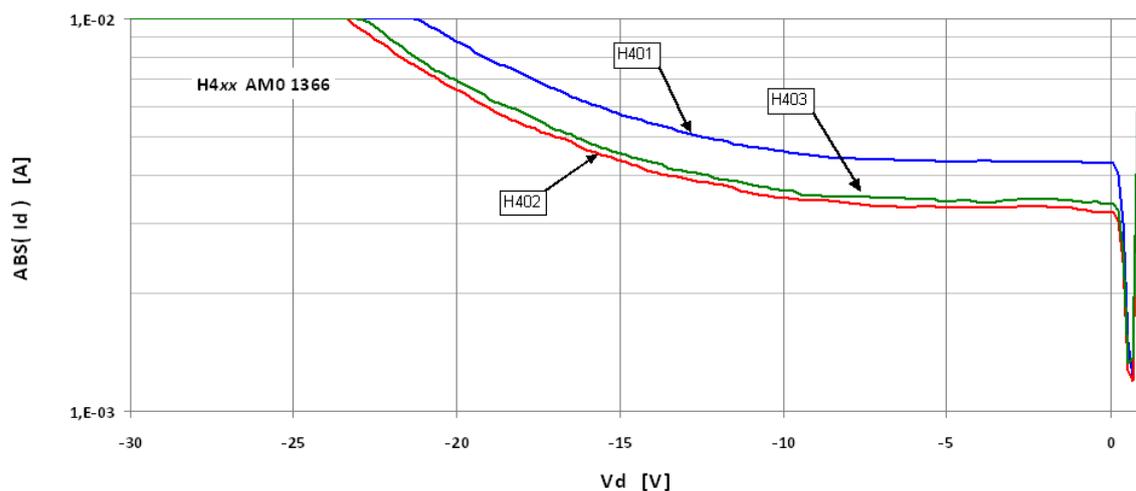
## 4.2 Mediciones con luz

Para ver el comportamiento de la corriente fotogenerada al incidir la luz en el dado se han realizado las mediciones bajo los espectros AM0 y AM1,5G. La corriente fotogenerada de cortocircuito en todas las mediciones efectuadas varía entre 2 y 5 mA.

A modo de resumen, se presentan las gráficas comparativas de los espectros, las diferencias de corriente a causa de la variación de áreas, el estudio de simetría en cada eje, y el cálculo de los parámetros característicos.

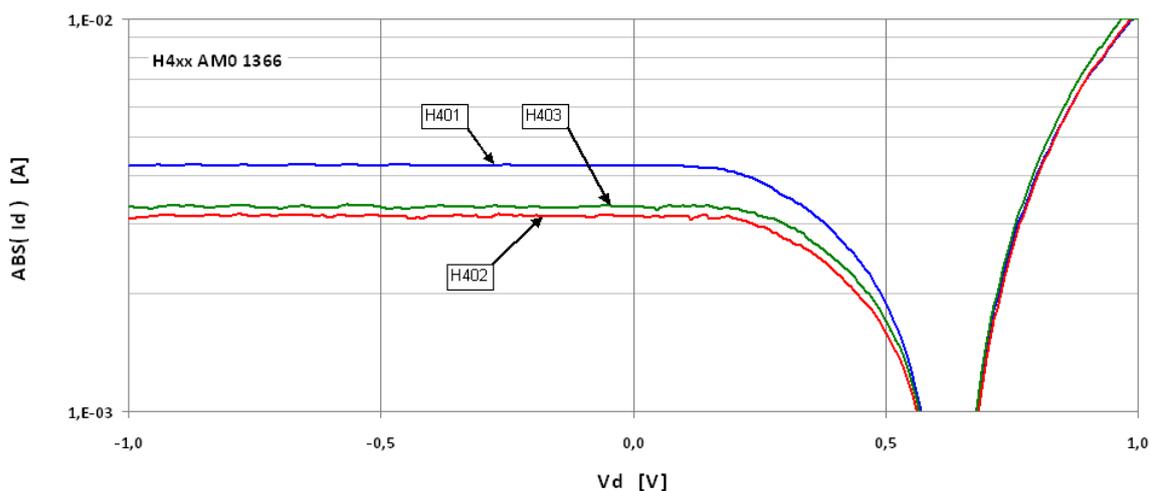
### 4.2.1 Variación de áreas

Es interesante ver cómo para una misma irradiancia la corriente fotogenerada aumenta linealmente con el área de los fotodiodos. El diodo 1 está situado en los extremos del eje y es el de mayor superficie, el diodo 3 es uno de los centrales que debería ser el más pequeño pero como hay que sumarle la semilongitud de la ventana tiene una superficie mayor que el diodo 2. El espectro representado es el AM0 1366 correspondiente al que existe fuera de la atmósfera terrestre.

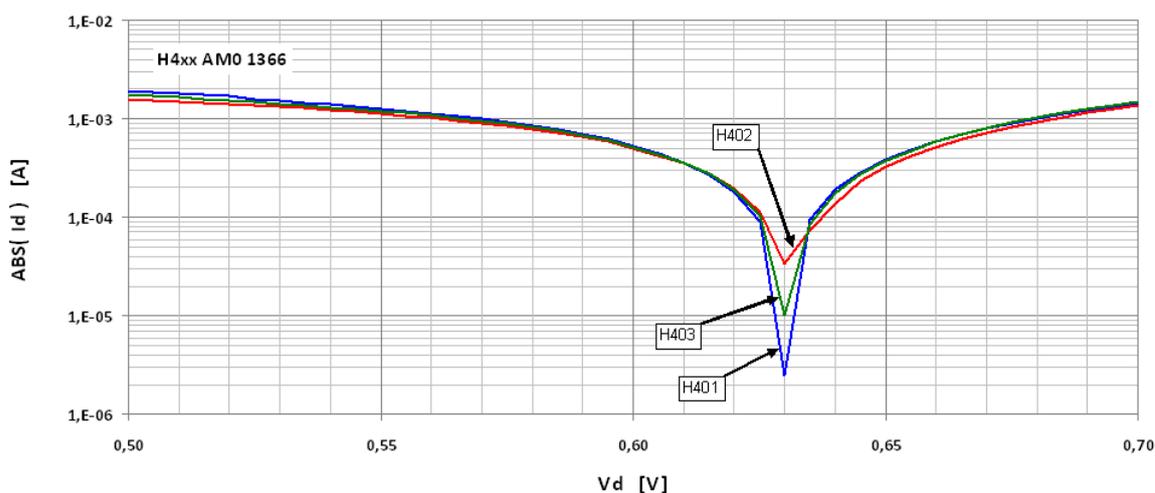


G 4.1 Variación de corrientes en función del área de los diodos

El dado H4 tiene una calificación de vuelo y presenta corriente constante en inversa hasta -8V, algunos de los dados con calificación de ingeniería tienen un comportamiento constante hasta -5V mientras que algunos calificados para pruebas físicas pierden la linealidad a los -3V. Las oscilaciones de la curva pueden asociarse a fluctuaciones de la intensidad de la bombilla de arco.



G 4.2 Zoom de la variación de corrientes en función del área



G 4.3 Independencia de  $V_{OC}$  con el área de los diodos

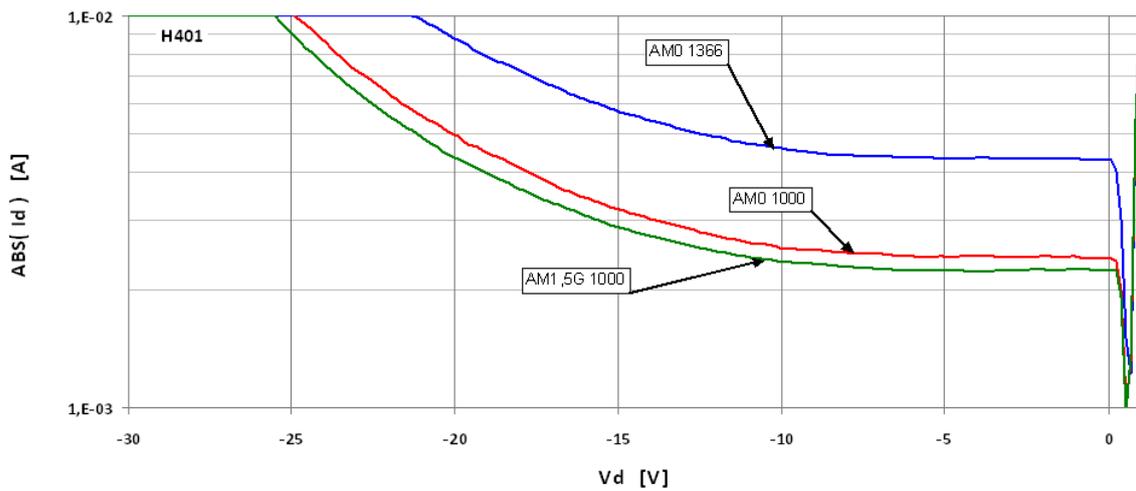
Con el barrido de -1 a 1 V se visualiza el comportamiento plano de la corriente inversa hasta 0V. Haciendo un zoom en torno a  $V_{CO}$  se puede calcular su valor y apreciar como el cambio de área no produce variación de ésta. El valor de la corriente en el mínimo de la gráfica no coincide con el valor real de  $V_{CO}$  ya que la resolución está limitada. La disparidad de corrientes en este punto singular de la gráfica obedece a que están tomadas en puntos cercanos a  $V_{CO}$ . Para el cálculo exacto se interpolan los valores de las muestras.



## 4.2.2 Variación de irradiancia

La célula solar responde a un determinado rango de longitudes de ondas que depende del sustrato utilizado. El espectro AM1,5G principalmente difiere del AM0 por su falta de UV que es filtrado por el ozono y porque hay amplios intervalos de longitudes de onda que son atenuadas por el agua y el dióxido de carbono.

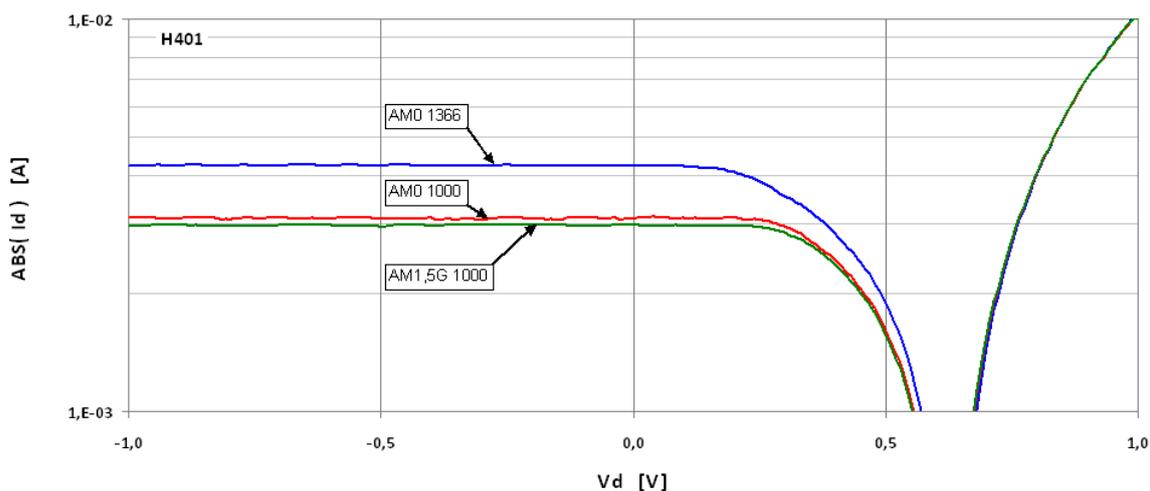
Se presenta a modo de resumen una comparativa de un diodo bueno bajo la influencia de los dos espectros.



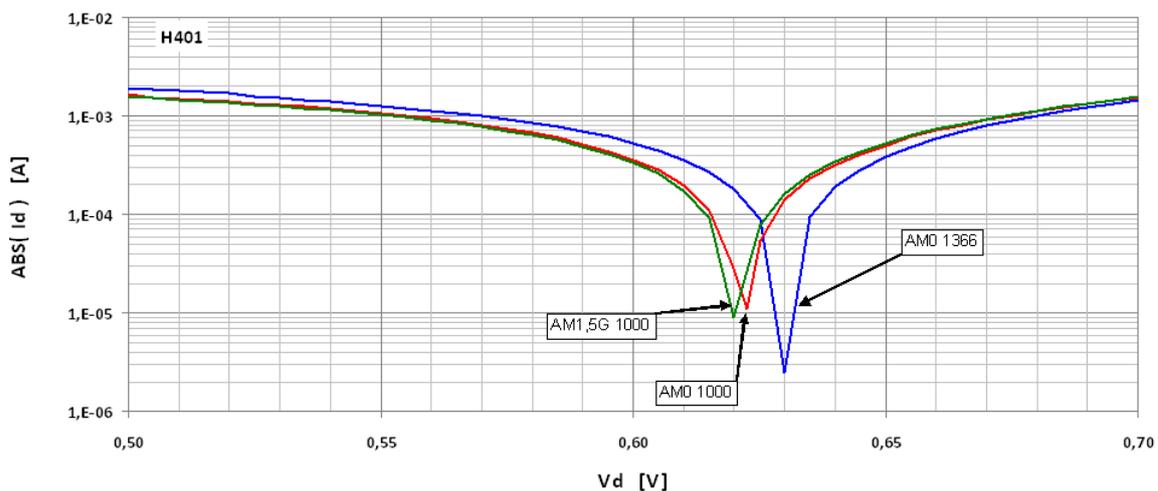
G 4.4 Variación de la irradiancia en la zona en inversa

Se puede apreciar una clara dependencia de la corriente fotogenerada con la potencia irradiada y un comportamiento no esperado en el cambio de espectro a iguales potencias. Sin embargo, la forma de las gráficas no está en función del espectro ni de su irradiancia.

El c-Si utilizado en el Vector Sol Fino tiene un rango de absorción entre los 400 y 1100 nm, rango que se encuentra por debajo de la filtración de los UV del ozono y por encima de las filtraciones del agua; es de esperar, que al calibrar el simulador para AM1,5G para la misma potencia de irradiancia que el AM0 (1000 W/m<sup>2</sup>), la célula genere más corriente, ya que el espectro AM1,5G es menor y mejor ajustado al rango de absorción del c-Si y para mantener el área bajo la curva es necesario aumentar los valores de irradiancia y por consiguiente aumentaría la fotocorriente. En la gráfica se refleja lo contrario atribuyendo el problema al piranómetro con el que se calibra la potencia del simulador, que no responde al espectro AM0.



G 4.5 Zoom de la variación de corrientes en función de la irradiancia



G 4.6 Dependencia de  $V_{oc}$  con la irradiancia

En este caso se mantiene el área expuesta a la luz (mismo diodo H401) y se ve como el cambio de espectros y de potencia de irradiancia hace variar  $V_{co}$ . Tal como se esperaba según los estudios teóricos.



### 4.2.3 Parámetros característicos

A fin de comparar con otras células solares de fabricación comercial, el estándar más utilizado es el AM1,5G 1000 ya que es de uso terrestre y es con el que se caracterizan habitualmente.

Con los datos de alta resolución de  $-1a1V$  se traza la curva de potencia y se calcula el PMP,  $I_m$  y  $V_m$ ; por interpolación se calcula  $V_{CO}$  con más exactitud e  $I_{sc}$  es el valor de la muestra de 0V. A continuación se calcula el FF.

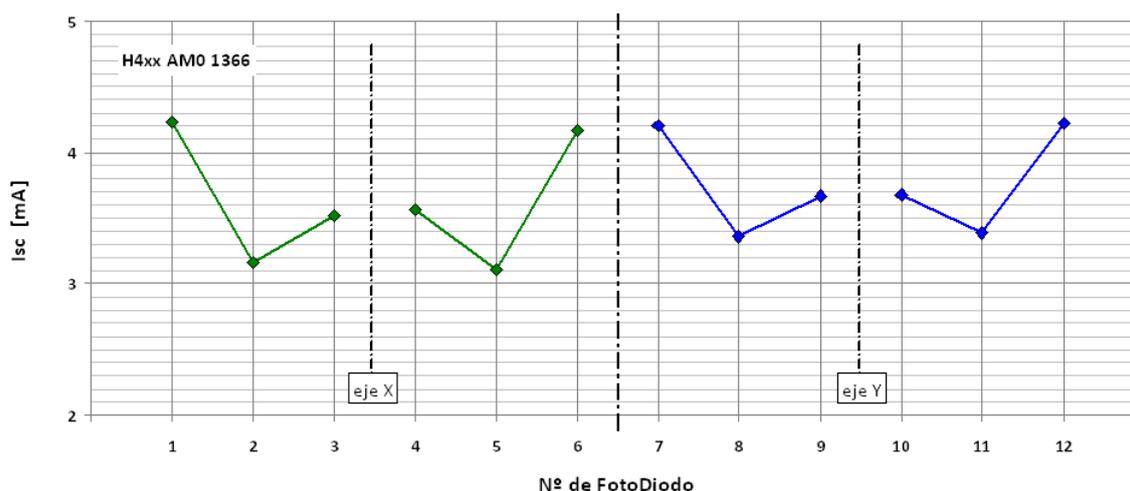
AM1,5G 1000	$V_{CO}$ [mV]	$I_{sc}$ [mA]	$V_m$ [mV]	$I_m$ [mA]	PMP [ $\mu$ W]	FF [%]
H401	620,5	2,977	385,0	2,462	947,9	51,3
H402	619,8	2,180	405,0	1,792	725,8	53,7
H403	619,9	2,387	405,0	1,983	803,2	54,2

T 4.2 Parámetros característicos

Los valores de FF son tan bajos porque la célula esta diseñada para trabajar con áreas iluminadas menores, que conlleva a corrientes mas pequeñas y se minimizan las perdidas en las resistencias series tal como se verá cuando se coloque la tapadera.

### 4.2.4 Simetría de ejes

La corriente fotogenerada depende del área de los diodos, por ello es interesante comparar la simetría que hay entre los semiejes del sensor. En la gráfica se representa la  $I_{sc}$  en función del número de diodo de cada semieje separados por una línea de simetría.



G 4.7 Correlación de corrientes por semieje

Aunque es de esperar que los ejes x e y sean iguales, por motivos de construcción, los diodos son de anchos diferentes para facilitar el contacto hasta los pads. En el funcionamiento del sensor esto no influye porque el área iluminada queda limitada por la ventana y la corriente no dependerá del área del diodo sino la de la ventana que será igual para todos.



### 4.3 Mediciones con temperatura en oscuridad

Los estándar de medición suelen ser a temperatura ambiente (25°C) pero la temperatura real de trabajo de una célula solar en la Tierra es alrededor de los 50°C y las dispersiones de temperatura en el espacio es aun mayor, de -50°C a 120°C, según si le da el sol o está a la sombra. Obviamente el sensor solar funcionará cuando le dé el sol.

El problema radica en que la corriente inversa del diodo en oscuridad  $I_0$  aumenta con la temperatura y tiene una fuerte dependencia con ella. Los primeros estudios se realizan con un dado de baja cualificación, el D6.

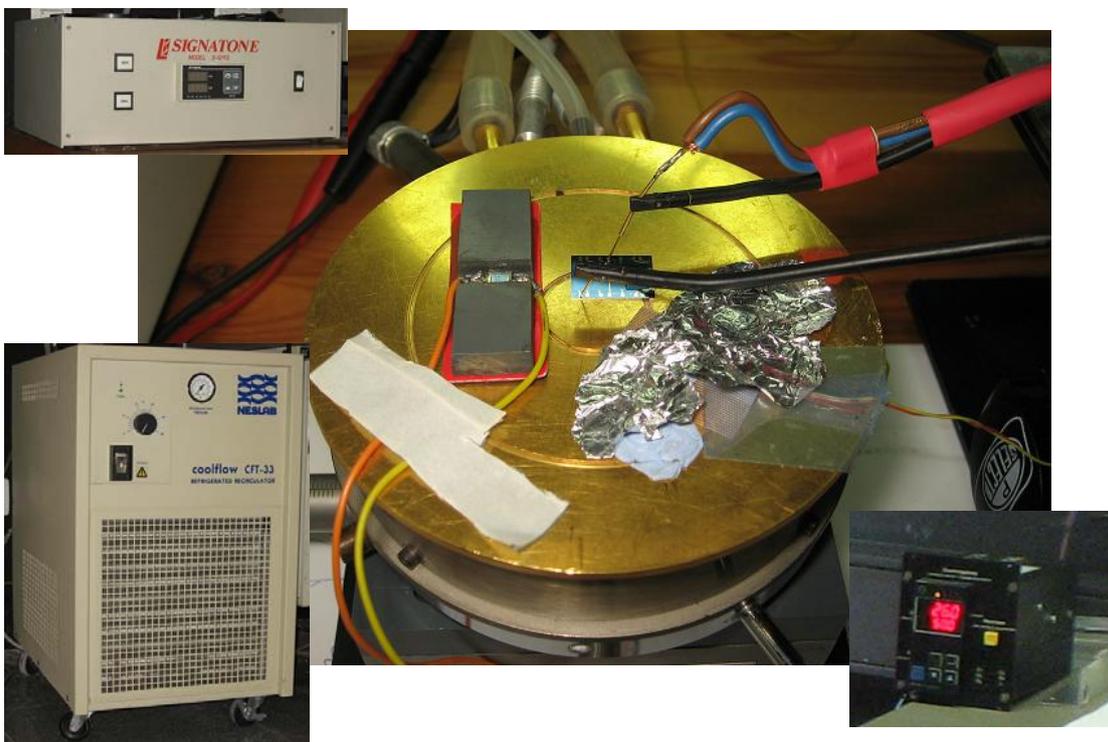
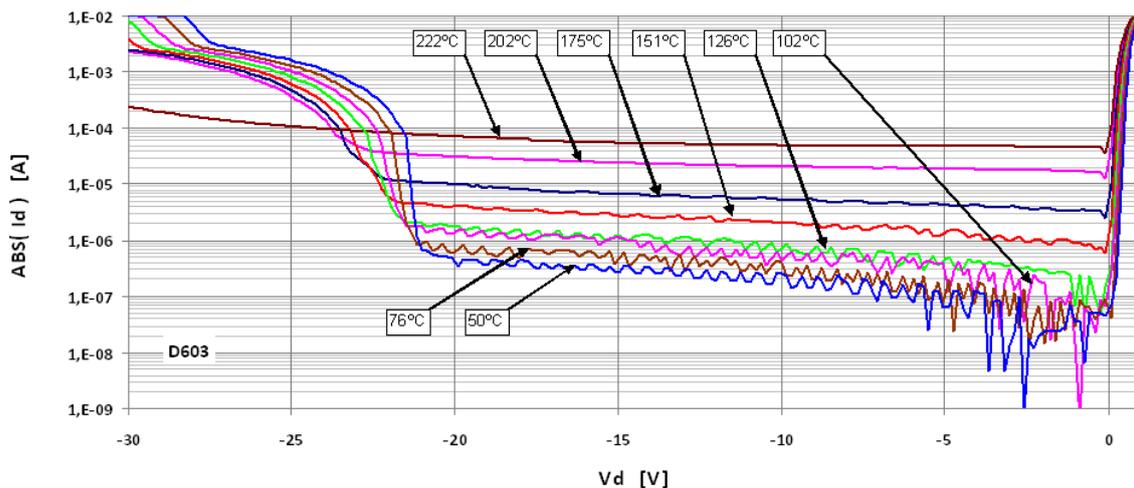


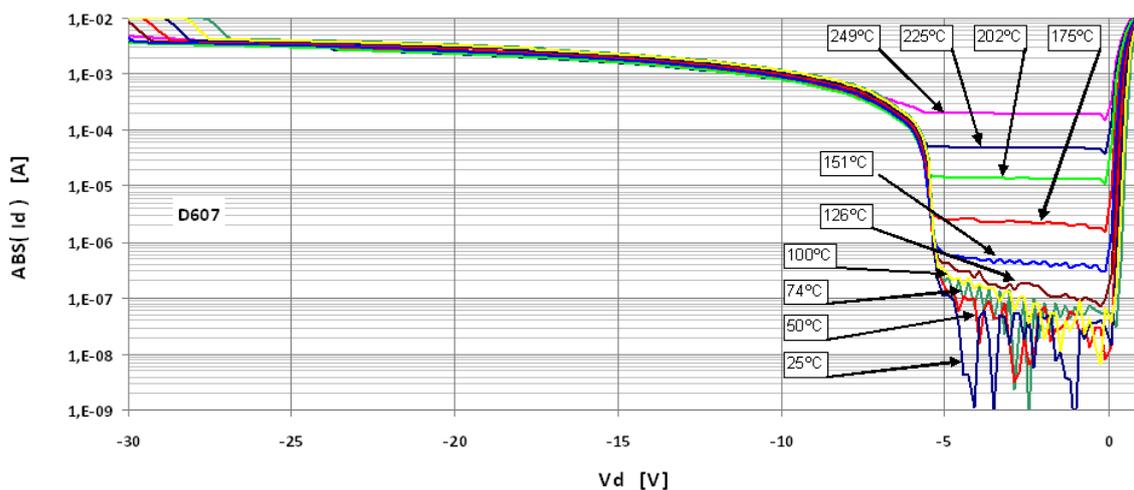
Fig. 4.4 Setup con Temperatura

Para el control de temperatura se dispone de un control PID, el inconveniente que tiene es que sensor es interno al shuck y no mide la temperatura de la superficie sino la de de todo el conjunto, es por ello que no se utiliza y se realiza las medidas subiendo la temperatura hasta 200°C y por disipación al ambiente a medida que se enfriaba, al llegar a la temperatura de medición se realizaba la adquisición de datos. Para evitar gradientes de temperatura en la superficie se coloca un termopar próximo al dado obteniendo una medida más real de la temperatura del dado y se controla con un termómetro adicional más preciso.



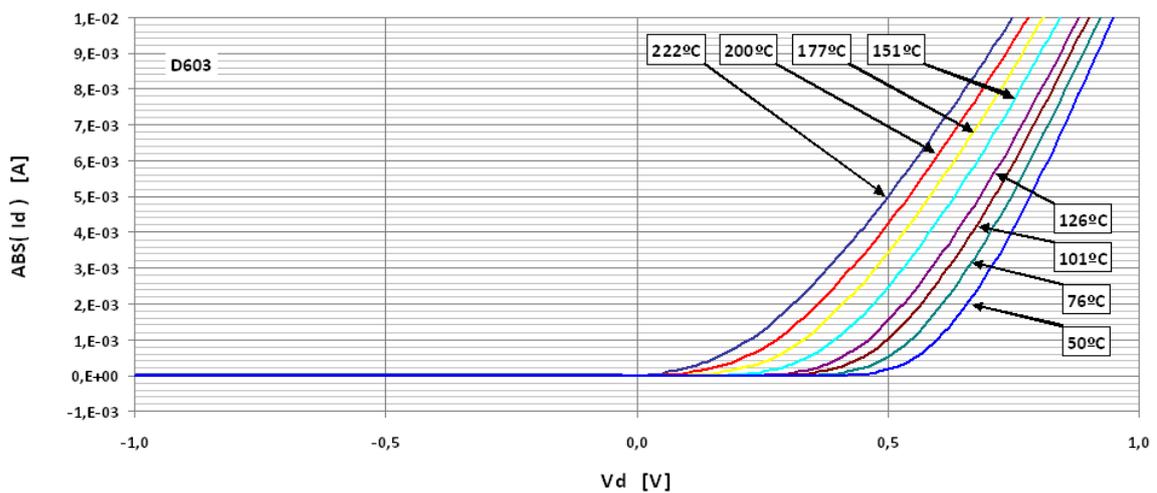
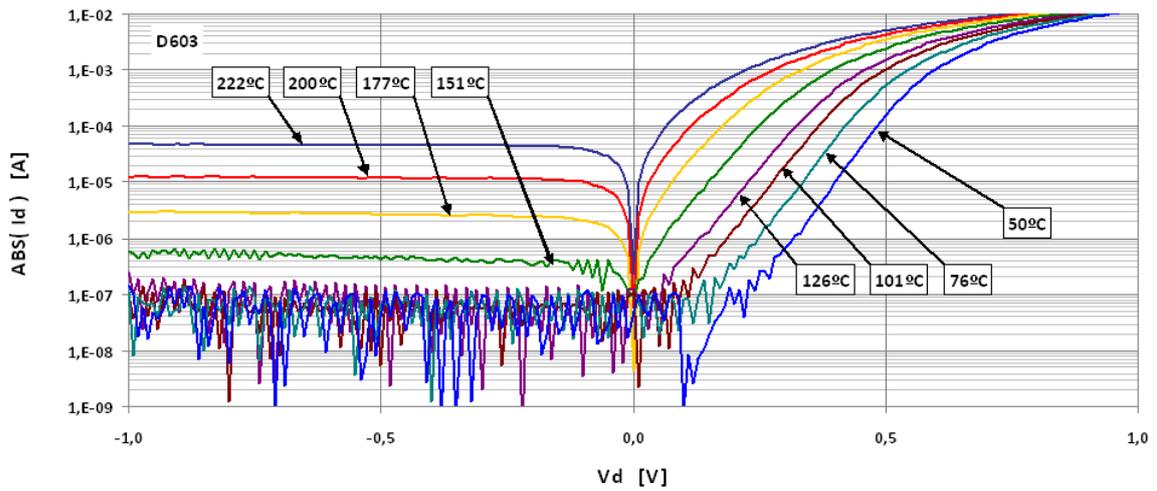
**G 4.8 Comportamiento en inversa con temperatura diodo BUENO**

El diodo D603 era bueno, en la grafica de 222°C se ve como la ruptura es inferior a -27V que corresponde al primer barrido en temperatura, al hacer una segunda elevación de temperatura de shuck el diodo se deteriora y las sucesivas curvas se aprecian una primera ruptura a -22V y una segunda a -27V. De esta fatalidad, asociamos el efecto de doble ruptura de los diodos al recocido. Por otro lado, la tensión de la primera ruptura que podría afectar la zona de trabajo disminuye con la temperatura cosa que es buena. La  $I_0$ , como era de esperar, aumenta su valor con la temperatura, de manera que para aumentos de pasos fijos de temperatura aumenta a pasos logarítmicamente constantes.



**G 4.9 Comportamiento en inversa con temperatura diodo MALO**

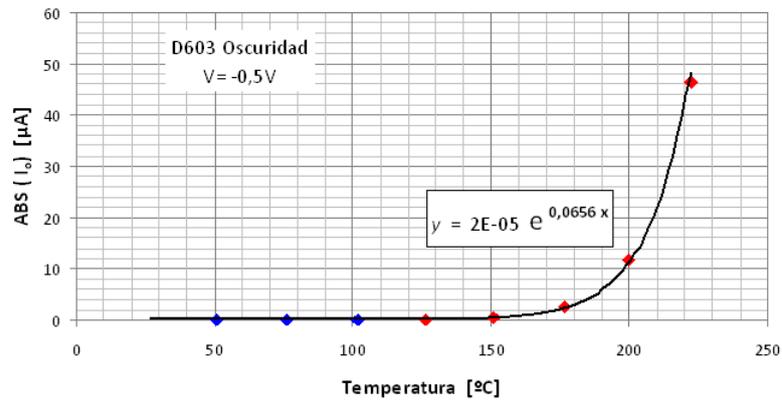
El diodo D607 ya presentaba la primera ruptura a -5V y con el estudio en temperatura se ve como se mantiene constante y no afectaría al correcto funcionamiento del sensor.



#### G 4.10 Comportamiento con temperatura, alta resolución LOG y LIN

En el trazado semilogarítmico se pueden apreciar las variaciones de corriente en inversa el Instrumento Caracterizador no permite distinguir las corrientes por debajo de  $10^{-7}$  correspondientes a las temperaturas menores de  $125^{\circ}\text{C}$ .

En la gráfica lineal se aprecia el desplazamiento negativo de la curva al aumentar la temperatura, este variación esta ligada con el cambio de  $V_{CO}$  al aumentar la temperatura en las mediciones bajo luz.



G 4.11 Variación de  $I_0$  con la temperatura

Como conclusión se representa la variación exponencial de  $I_0$  con la temperatura bajo oscuridad del diodo D603. Los puntos en azul no fueron tenidos en cuenta para calcular la línea de tendencia debido a que son medidas con una relación de ruido elevada. El valor esta tomado a tensión constante de -0,5V.



## 4.4 Tapadera

El último paso en la construcción del sensor es la colocación y pegado del cristal tapadera. Se alinea con los trazos diseñados en la fabricación de la oblea y se pega con un pegamento tipo epoxi en las cuatro esquinas.

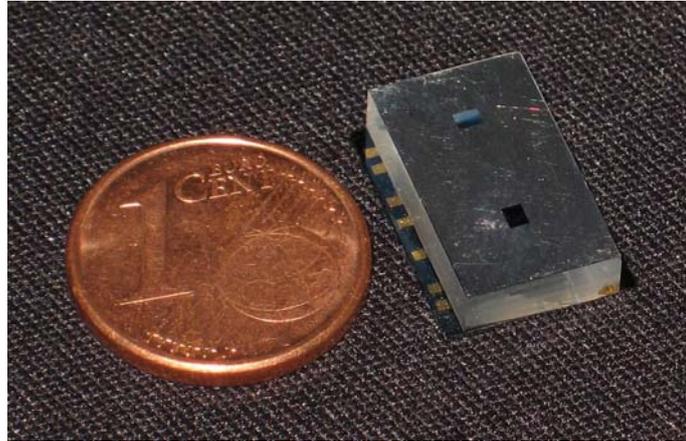


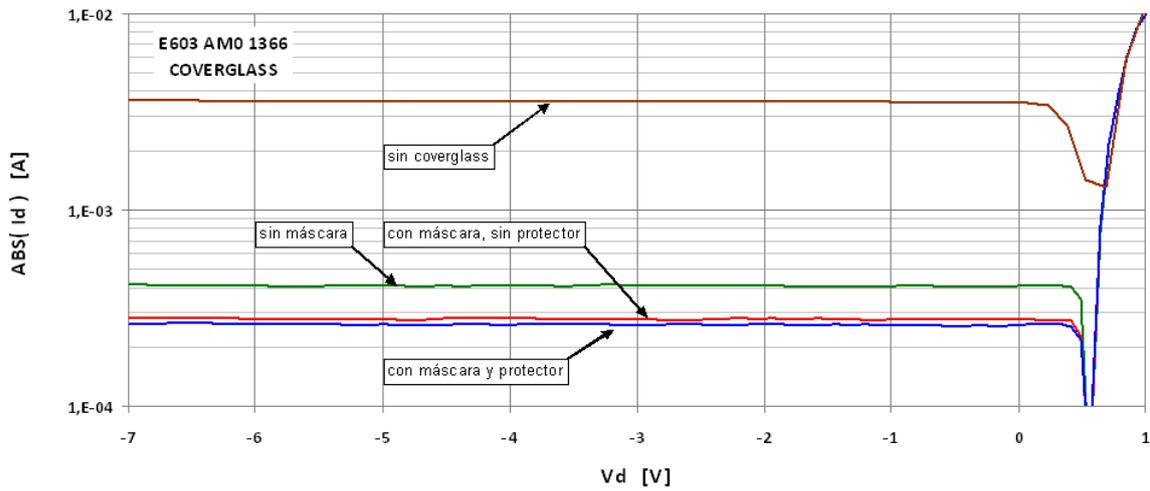
Fig. 4.5 Dado con tapadera

El cristal utilizado filtra los UV y rayos cósmicos que no interesan que lleguen hasta las células ya que no aportan fotogeneración de corriente. Se vuelven a realizar las pruebas con luz ya que el espectro que llega ahora es filtrado por el cristal y la ventana reduce el área de iluminación. También se realizan pruebas de temperatura con luz.

Para hacer las mediciones hay que tener en cuenta ciertas consideraciones. El simulador solar ilumina gran zona del shuck que hace de espejo reflejando luz por los laterales del cristal desvirtuando, por tanto, la medición. En los pads y laterales del dado también se generan portadores que llegan hasta el fotodiodo en medición sumando más corriente fotogenerada. Por esto se diseña y construye una máscara que sólo deja pasar la luz en la zona central de la tapadera, tiene que tener espacio en los laterales para que puedan llegar las puntas a pinchar los pads y tiene que ser antirreflejo para que no haga rebotar luz dirigiéndola a la ventana. Por último, también se hacen mediciones con un protector de cristal que irá montado en la carcasa en el ensamblado final del producto y que protege a todo el coverglass. Las mediciones sólo se realizan con luz incidente normal al sensor, ya que no se dispone de simulador solar en ángulo, la calibración en ángulo se realiza en el laboratorio de la Universidad de Sevilla.



#### 4.4.1 Diodo central de eje, luz directa.



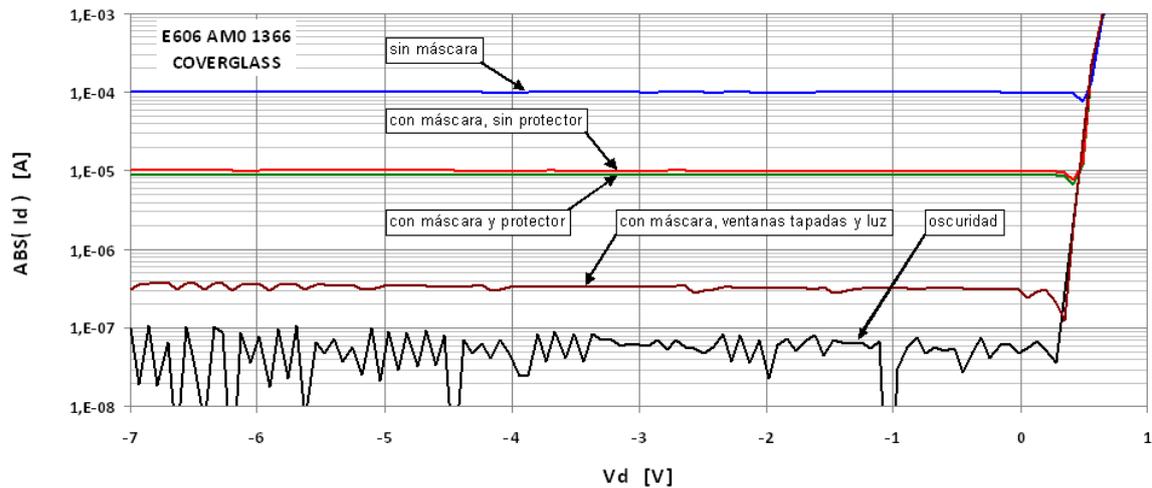
G 4.12 E603 con coverglass

En la gráfica se puede apreciar el importante decremento de la corriente al colocar el coverglass y la máscara, desde 3,3mA, con todo el fotodiodo iluminado, hasta 0.28mA al estar sólo iluminado la superficie correspondiente a media área de la ventana (la otra mitad ilumina al fotodiodo E604) lo que implica más de una década de disminución.

La corriente fotogenerada por la luz reflejada sin colocar la máscara es casi la mitad de la generada por la luz incidente directa. Al colocar el protector final hace que disminuya un 3% más.



#### 4.4.2 Diodo extremo de eje, luz parásita



G 4.13 E606 con coverglass

El diodo E606 se encuentra en el extremo del eje situado en el centro del dado, de modo que al ser iluminado con luz perpendicular en principio no tiene que generar fotocorriente ya que esta debajo de la sombra de la tapadera.

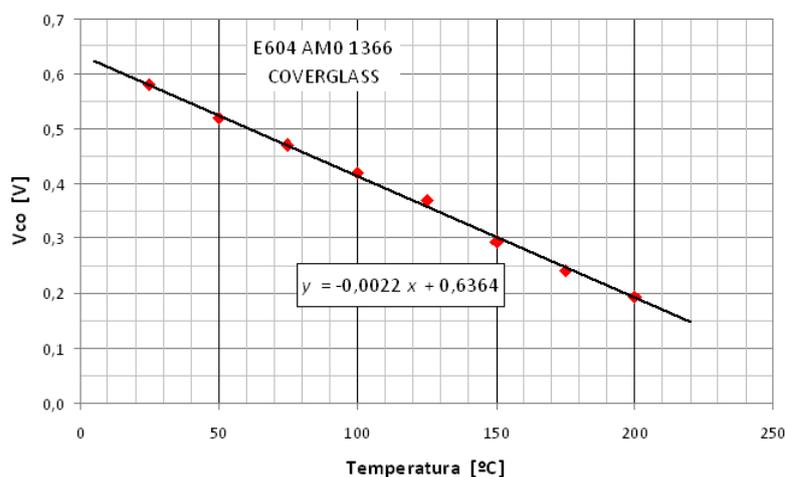
La diferencia de corrientes con el E603 es de más de una década (0,28 y 0,01 mA) con máscara y protector; aún así, esta diferencia será mayor si los fotodiodos vecinos estuvieran con carga ya que la corriente generada es asociada a portadores generados en los fotodiodos E603 y E604 iluminados y que llegan hasta el E606 al no tener un camino de circulación por ausencia de carga y no se puede asociar a rebotes internos de la luz ya que incide a 90°.

Un ensayo interesante es ver la corriente generada con las ventanas tapadas, es decir, se hizo una máscara que solo dejaba pasar luz en la zona central de la tapadera donde esta la película metálica que bloquea la luz, observando su eficiencia y comparándola con la corriente en inversa del fotodiodo en oscuridad. En principio la corriente se asocia rayaduras de la película metálica ya que el dado fue muy manipulado, igualmente es tres décadas inferior a la del diodo central.



### 4.4.3 Temperatura, luz y tapadera

La forma de las corrientes en inversa no se ven afectadas por el aumento de  $I_0$  con la temperatura frente a los altos valores de la corriente inversa con presencia de luz. En cambio sí es importante ver como varía la  $V_{OC}$  con la temperatura.



G 4.14 Variación de  $V_{CO}$  con la temperatura

Interpolando las muestras de las tomas de alta resolución se calculan las  $V_{OC}$  con mayor exactitud para cada temperatura, se traza una recta y su pendiente es el coeficiente de variación de la temperatura  $-2,2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ .

Este ensayo con altas temperatura pone a prueba también el pegamento epoxi utilizado para adherir la tapadera y la calidad de la deposición del metal en el cristal utilizado en el coverglass que han pasado exitosamente las pruebas sin haber sufrido ninguna alteración.

### 4.4.4 Parámetros característicos con luz

Colocada la tapadera en el sensor, disminuye el área iluminada y por tanto, disminuye la corriente fotogenerada; en consecuencia, la caída de tensión en la resistencia serie del fotodiodo disminuye mientras que  $V_{CO}$  sufre una variación menor, lo que resulta en una forma más rectangular de la característica I-V. Así, el FF aumenta considerablemente. Se ha realizado la comparación de este parámetro para ver la calidad de la fabricación, si bien el dispositivo trabaja como fuente de corriente, se polariza en inversa para utilizarlo como sensor.

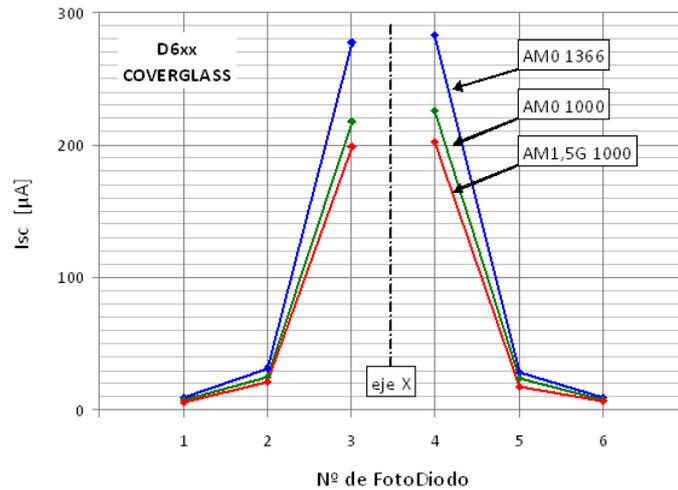
D603	$V_{CO}$ [mV]	$I_{SC}$ [ $\mu\text{A}$ ]	$V_m$ [mV]	$I_m$ [ $\mu\text{A}$ ]	PMP [ $\mu\text{W}$ ]	FF [%]
AM0 1366	559	262	467	244	113,9	77,8
AM0 1000	546	200	460	180	82,8	75,8
AM1,5G 1000	541	188	445	174	77,4	76,1

T 4.3 Parámetros característicos con tapadera



#### 4.4.5 Simetría de ejes

Iluminado sólo los fotodiodos centrales se puede ver en el gráfico la variación de  $I_{SC}$  en función de de los diodos del eje x y con los tres espectros de medición realizados con el dado con tapadera.



G 4.15 Simetría de eje x con tapadera

Se puede apreciar una leve variación de las corrientes entre los diodo D603 y D604 en las tres mediciones con luz, por lo que se concluye que se debe a un desplazamiento de la ventana con respecto al centro. Este defecto que queda subsanado en el momento de hacer la calibración del sensor.



## 5 Producto final y conclusiones

Una vez que ha concluido el proceso de fabricación del sensor, la Universidad de Sevilla por medio de su Departamento de Electrónica se encarga de la electrónica asociada siendo montado en una placa de circuito impreso y acondicionado debidamente para que la salida pueda ser tratada digitalmente. Allí se realizan las pruebas de calibración necesarias para comprobar el buen funcionamiento. Del resultado de integrar el sensor con la electrónica adicional y encapsularlo se obtiene el Producto Final llamado Vector Sol Fino (VSF).

El INTA somete el VSF a distintas pruebas para poder calificarlo y lo integra en el satélite INTA $\mu$ SAT.

### 5.1 Electrónica asociada

Comprende tanto la circuitería para el acondicionamiento de señal como la etapa multiplexora, el convertor A/D, el  $\mu$ procesador y el interfaz de comunicación con el control del satélite.

En el diseño de la electrónica se ha tenido en cuenta su robustez frente a cambios de temperatura, sencillez, fiabilidad y reducido tamaño. Mientras que en el antiguo sensor Vector Sol se colocaba un operacional por cada diodo para polarizarlos con una recta de carga vertical  $V=-0,3V$ , en el sensor del Vector Sol Fino se pondrá una carga resistiva que hará de transductor I/V para ahorrar volumen en el encapsulado

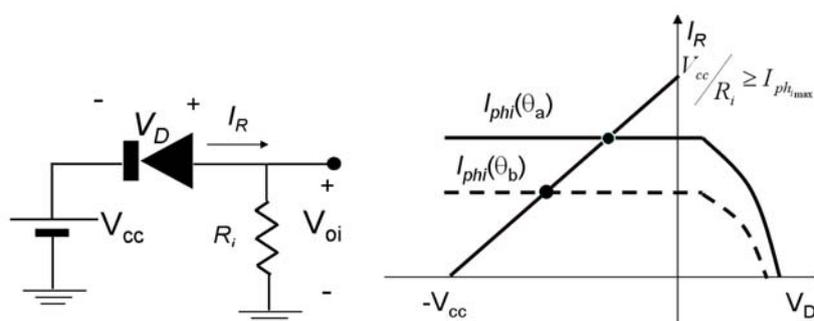


Fig. 5.1 Polarización del diodo

Como la corriente en inversa del diodo es proporcional a la irradiancia absorbida y es constante en un amplio rango de tensión interesa que los diodos trabajen en la zona en inversa.

El valor de  $V_{oi}$  es el valor de la corriente que entrega la célula por el valor de  $R_i$  independientemente del valor de  $V_{cc}$  y se calcula para obtener el mayor rango dinámico en el proceso de digitalización, que estará comprendido entre 0 y 5V.

El valor de  $V_{cc}$  es tal que el diodo siempre quede polarizado con tensiones negativas en todo el rango dinámico, garantizando la linealidad de la corriente con la irradiancia. Por ello,  $V_{cc}$  debe ser igual o mayor que 5V.



En el subcapítulo “4.4.4 Parámetros característicos con luz” se mide la corriente fotogenerada cuando la luz incide perpendicularmente a través de la ventana en el diodo 3, obteniéndose 0,3 mA, en este caso sólo se ilumina la mitad del diodo. Despreciando la variación de la irradiancia al cambiar el ángulo para el cual se ilumina todo el diodo, se deduce que la corriente máxima será de 0,6mA. Con estos valores se calcula una  $R_i = 8,2 \text{ k}\Omega$ .

Un Multiplexor permite la utilización de un único convertor A/D (de 12 bits o más) para los 12 diodos y es controlado por un microprocesador que hará el cálculo del ángulo incidente. Como quiera que el VSF debe ser de reducido tamaño y peso, una de las opciones es que dicho microprocesador esté incorporado en el propio satélite con lo que sería el encargado de realizar otros cálculos propiamente del satélite.

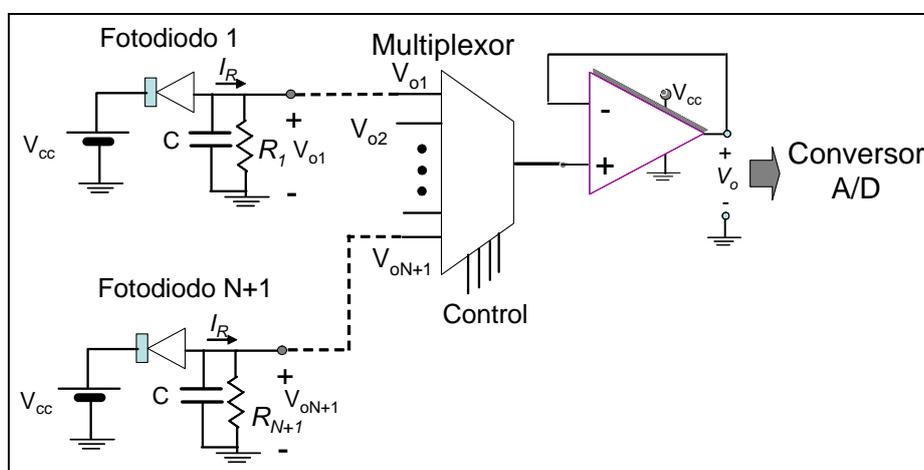


Fig. 5.2 Esquema electrónico

## 5.2 Encapsulado

En el dado de silicio se han diseñado los pads en la periferia de la tapadera para hacer el wire-bonding. Esta técnica consiste en soldar entre los pads del dado y la placa de circuito impreso un hilo de oro que hace la unión eléctrica. Previamente el dado se pega a la PCB con un pegamento tipo epoxi para altas temperaturas.

Para el dispositivo de vuelo los componentes electrónicos utilizados deben ser de categoría militar o para uso espacial ya que las temperaturas en el espacio varían muy rápido y con un amplio rango. Para los dispositivos de ingeniería se pueden utilizar componentes comerciales ya que solo se utilizarán para pruebas electrónicas y de diseño.

El material de la carcasa y su grosor cumplen un papel fundamental en el sensor; las radiaciones cósmicas y el espectro solar dañan la electrónica e introducen mucho ruido, por ello, se ha construido una carcasa en comparación con el VSF. El material tiene que ser ligero resultando idóneo el aluminio. Concretamente se considera el aluminio anodizado negro en la cara superior para evitar el albedo.

El diseño de la cubierta superior tiene que permitir la entrada de todo el FOV al sensor; en el antiguo Vector Sol (VS) se había realizado una pirámide invertida que dejaba pasar la luz, en el



diseño del VSF como la tapadera es tan gruesa se diseña de tal forma que la superficie de las ventanas queden al borde superior.

Por último, se incorpora el cristal Pyrex haciendo estanco el dispositivo y protegiendo al sensor del exceso de radiaciones solares y cósmicas que captarían los fotodiodos a través de las ventanas.

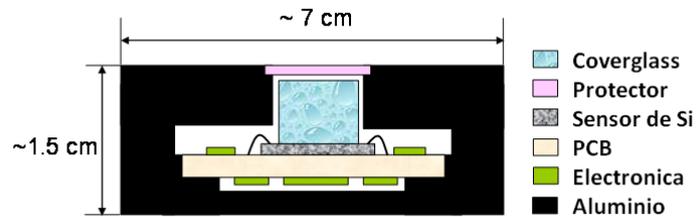


Fig. 5.3 Corte transversal de un modelo

A continuación se presentan las características físicas y eléctricas del sensor:

Características	Dado + Coverglass	Producto Final
Volumen [cm <sup>3</sup> ]	0,5	73,5 (7x7x1,5)
Peso [g]	< 1	< 150
Consumo medio [mW]	<5	< 100

#### T 5.1 Comparativa entre el sensor y el producto final



### 5.3 Calibración

El banco de calibración consiste en un posicionador angular de dos ejes que incorpora al simulador solar de manera que el conjunto simula todo el abanico del FOV de  $\pm 60^\circ$  con una precisión de  $0,1^\circ$ . Primero se ajusta el cero del sistema de medición y luego se hace la rotación en todo el FOV en pasos de  $5^\circ$ . Como el sensor ya tiene la electrónica de control es posible trazar las curvas de ángulos relativas. Todo el proceso es controlado por el programa Labview 8.0

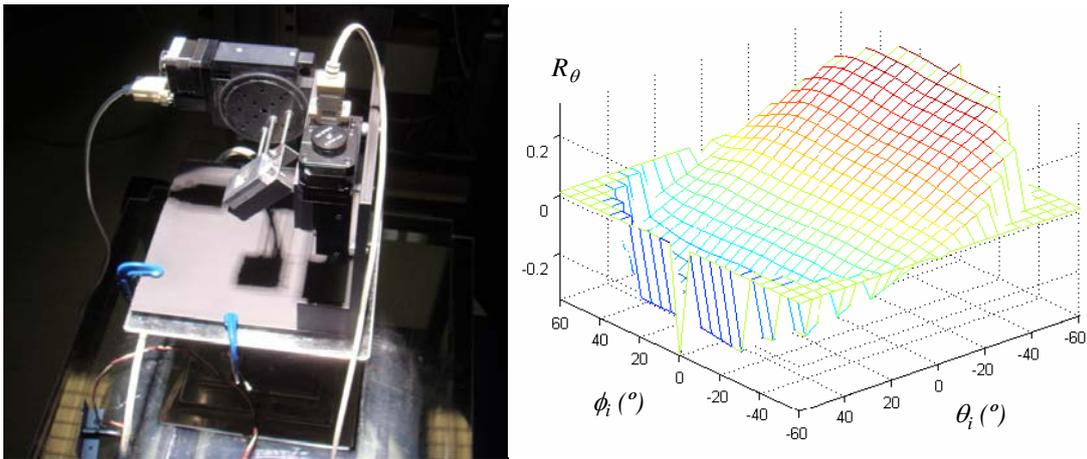


Fig. 5.4 Calibrado y curvas de  $R(\theta)$

La gráfica relaciona las proyecciones sobre el plano xy y el plano xz del ángulo de incidencia con la función diferencia relativa. Se observa la forma de la función tangente de  $R(\theta)$ . La ley de Snell no se cumple exactamente cuando se relacionan ángulos con proyecciones de ángulo, por ello aparece una superficie curvada que expresa esa inexactitud.



## 5.4 Calificación

Los sensores acabados y con la construcción definitiva, fabricados con dados de calificación y con la electrónica espacial, son sometidos a pruebas en los laboratorios del INTA en Madrid.

El Producto Final provisto de sensores con calidad de Calificación y electrónica de calidad espacial es sometido a diferentes pruebas:

### *Desgasificación.*

Bajo presiones de  $10^{-7}$  mbar se simula el vacío y se observa su comportamiento,

### *Térmicas.*

Con rampas de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  y 10 ciclos con amplitud de  $\pm 50^{\circ}\text{C}$  y 5 ciclos con amplitud de  $\pm 120^{\circ}\text{C}$  para comprobar la posible degradación de los diodos, el pegado de la tapadera y del dado, etcétera.

### *Vibración.*

Ensayos de 10g y frecuencias hasta 1 kHz y de impacto de aceleraciones desde los 50 hasta los 30000g durante 1 y 0,12 s respectivamente para probar la calidad del wire bonding y el pegamento y detectar fallos mecánicos

### *Radiación*

En un acelerador de partículas Tandem Van de Graaff se lo bombardea con protones e iones con una energía máxima de 4MeV durante un tiempo simulando la radiación cósmica.



Fig. 5.5 Van de Graff INTA



## 5.5 Mejoras y futuros desarrollos

Con un aumento del grado de integración de fotodiodos se intenta mejorar constantemente el sensor; del mismo modo que el VSF es una mejora del VS debido a que se construyen 12 diodos en lugar de los 4 del VS, se está estudiando un diseño donde se integren 16 diodos y aumentar la sectorización del FOV mejorando así las prestaciones.

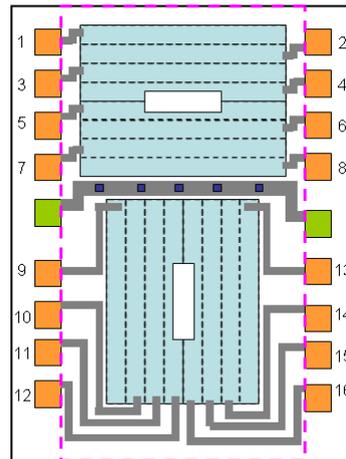


Fig. 5.6 Sensor con 16 fotodiodos



## 5.6 Conclusiones

### *Yield*

De los 32 dados fabricados 7 dados han salido deficientes (Calidades de Ingeniería<sup>2</sup> y Pruebas Físicas), los cuales se han utilizado para hacer pruebas de pegado de tapadera y de wire-bonding. El yield es de 78%. De los 7 diodos, 5 de ellos son los que se encontraban en la periferia de la oblea como cabía esperar y por tanto han sufrido tanto los errores de alineamiento de máscara en los procesos litográficos como las degradaciones para manipular la oblea.

### *Recocido*

El último paso de la fabricación de la oblea es un paso que no está especificado en el subcapítulo “1.4 Proceso de fabricación de oblea” y va en función de las metalizaciones de los conductores. Un proceso de fabricación más sencillo que el utilizado dio por resultado que en el recocido todos los diodos quedaran en corto circuito por lo que se volvió a utilizar el proceso de fabricación del antiguo VS. En esta nueva oblea, el tiempo y la temperatura del recocido no han todo lo favorables que hubiera sido deseable ya que en algunos diodos se generaron segundas rupturas, por lo que en los futuros dados se debería modificar cualquiera de estos dos parámetros.

### *Característica en inversa*

Como el antiguo VS fue caracterizado en un barrido de -1 a 1V, se siguió la misma pauta de caracterización para el VSF y luego se aumentó el rango de medición de -5 a 1 V y se comenzaron a ver los defectos de la ruptura de la unión. Por ello, se creyó conveniente aumentar paulatinamente la tensión de barrido limitando la corriente máxima para no perjudicar los dispositivos hasta observar que para -27 V tenía lugar la ruptura en todos aquellos diodos en los que se observó una única ruptura (clasificados con una puntuación a partir de 8). Por ello, se realizaron a partir de entonces mediciones desde -30 a 1 V y la caracterización para los dados recocidos fue realizada con este último barrido ya que ofrece un amplio rango de observación de la zona en inversa.

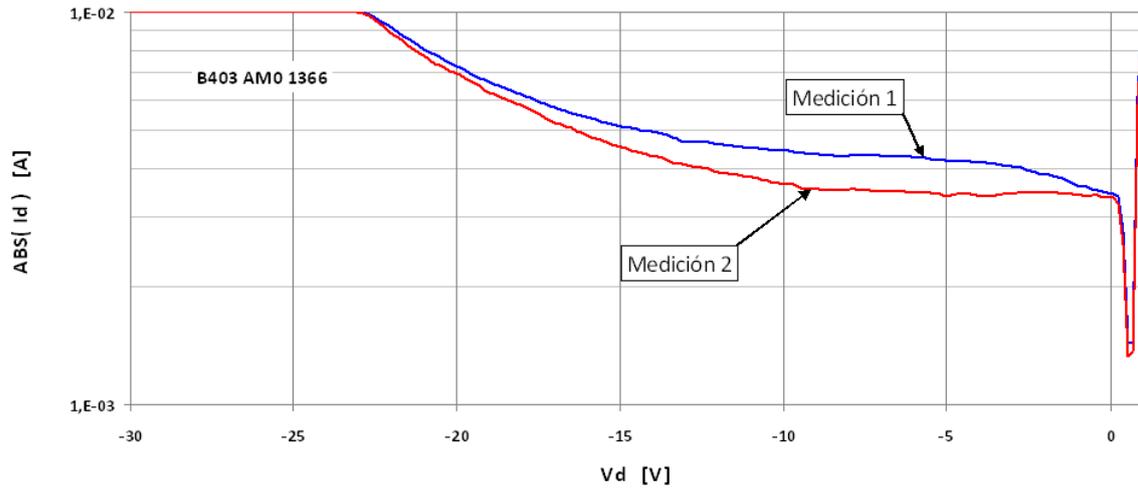
### *Espectros de luz*

Las pruebas con luz no resultaron según lo esperado: el hecho de que la corriente fotogeneradas con AM0 1000 sea mayor que la con AM1,5G 1000 no se ajusta a la lógica (Apartado 4.4.4 Parámetros característicos con luz) Se ha hecho un estudio variando la potencia de la lámpara y comparando la corriente fotogeneradas por el diodo sensor y el piranómetro para ver si había linealidad, haciendo coincidir igual potencia de piranómetro con distintas potencias de lámparas cambiando el diafragma y se ha observado completa linealidad. En un principio se intuía que podía cambiar el espectro de la lámpara de xenón pero la prueba anterior descarta esta posibilidad. Por esto se le atribuye el error al piranómetro del cual no encontramos especificaciones ya que es muy antiguo y suponemos que está diseñado sólo para trabajar con espectros terrestres y el espectro extraterrestre no lo mide completamente.



### *Pendiente con luz*

Al realizar mediciones con luz y sin tapadera se observó en alguna ocasión una pendiente de la característica I-V en la zona inversa próxima a cero y al hacer una segunda medición sale más constante. No se puede atribuir a oscilaciones de la luz ya que la corriente luego es mantenida. Tampoco a metodología de medición ya que es la misma en ambos casos. Un estudio en profundidad sobre este fenómeno pudiera habernos dado la justificación.



### **G 5.1 Pendiente con luz**

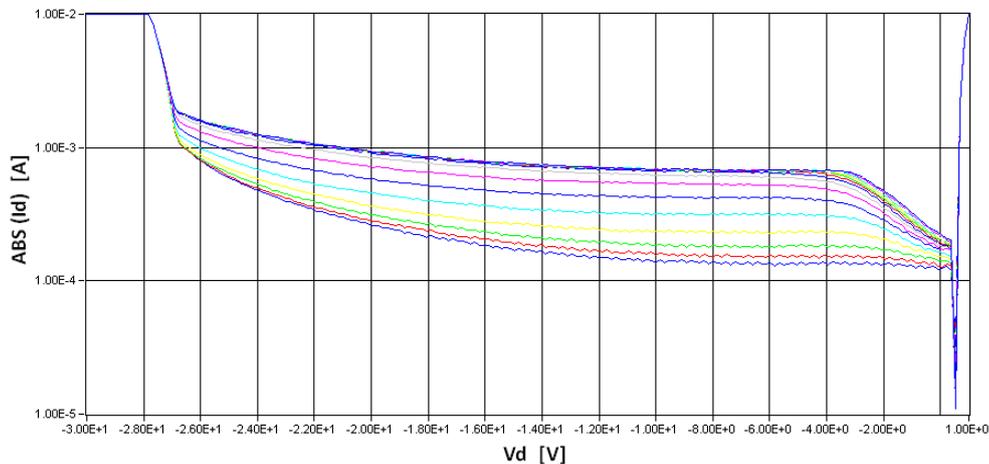
#### *Temperatura*

Los ensayos térmicos se realizaron con los fotodiodos buenos de un dado malo (Calidad de Pruebas Físicas) en unas de las rampas de subida (250°C) se ve cómo al fotodiodo le aparece una primera ruptura a -22v que antes no tenía, de aquí que los foto diodos que ya se miden con esta primera ruptura se les puede atribuir este fenómeno al proceso de recocido.



### *Efecto condensador de la tapadera*

Un efecto extraño sucedió al hacer las mediciones bajo luz con la tapadera colocada. Por accidente se observó que al realizar sucesivas e inmediatas mediciones la característica I-V iba superponiéndose una a otra observando así un efecto capacitivo.



**G 5.2 Efecto capacitivo de dado con tapadera**

No varía la luz ni la temperatura, pero en la gráfica se observa como la curva posterior genera más fotocorriente que la anterior y así sucesivamente generando una característica no constante en la zona de -4 a 1V que interesa que sea constante. Este efecto disminuye cuando el barrido de tensiones no es tan negativo, y si se espera un tiempo al hacer la siguiente toma de datos vuelve a comenzar recto, de aquí que las mediciones con luz y tapadera se realizan de -7 a 1V. Este efecto se asocia a que el coverglass crea un campo eléctrico que ayuda a la unión a generar más pares e-h disminuyendo las recombinaciones en la base. Cuando las células estén con carga esto no ocurrirá y no afectará a las mediciones del sensor ya que está polarizado de -5 a 0 V.





# A Bibliografía

- [1] P. Ortega, D. Biel, Transparencias de clase: Tema 1 “Introducción a la energía solar fotovoltaica”, asignatura: Células solares y sistemas fotovoltaicos (CSIF), UPC, Septiembre 2008.
- [2] P. Ortega, Transparencias de clase: Tema 2 “Cálculo de la irradiancia e irradiación en captadores solares”, asignatura: Células solares y sistemas fotovoltaicos (CSIF), UPC, Septiembre 2008.
- [3] P. Ortega, Transparencias de clase: Tema 3 “La célula solar. La física del dispositivo”, asignatura: Células solares y sistemas fotovoltaicos (CSIF), UPC, Septiembre 2008.
- [4] P. Ortega, Transparencias de clase: Tema 4 “Características eléctricas de la célula solar”, asignatura: Células solares y sistemas fotovoltaicos (CSIF), UPC, Septiembre 2008.
- [5] G. López, “Sensor solar con tecnología de silicio”, PFC, UPC, Mayo 2008.
- [6] P. Ortega, Presentación “diseño vectorsol high sensibilidad”, 2008.
- [7] P. Ortega, Presentación “Vectorsol”, Acción Especial ESP-2007-209975-E, Universidad de Sevilla, UPC, INTA, 2007.
- [8] Campbell scientific Inc., Manual de instrucciones “CM3 Pyranometer”, 2002.
- [9] Newport, Catálogo virtual de simulador solar 150-300W  
<http://www.newport.com/150---300-W-Solar-Simulators/376933/1033/catalog.aspx>